



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Dirección General de Estudios de Posgrado

Facultad de Ingeniería Industrial

Unidad de Posgrado

**Proceso de plasma frío a baja presión y su influencia
en el nivel de contaminación al realizar la limpieza de
láminas metálicas**

TESIS

Para optar el Grado Académico de Doctor en Ingeniería Industrial

AUTOR

Luis Marcelo LÓPEZ LÓPEZ

ASESOR

Ilse Janine VILLAVICENCIO RAMÍREZ

Lima, Perú

2019



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

López, L. (2019). *Proceso de plasma frío a baja presión y su influencia en el nivel de contaminación al realizar la limpieza de láminas metálicas*. Tesis para optar grado de Doctor en Ingeniería Industrial. Unidad de Posgrado, Facultad de Ingeniería Industrial, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.

INFORMACIÓN

Código ORCID del autor: <http://orcid.org/0000-0001-9353-384X>



Código ORCID del asesor: <http://orcid.org/0000-0001-8831-2604>

Grupo de Investigación: Grupo de Investigación en Nuevos Materiales Y Procesos de Manufactura (GIMAT)

Institución financiada parcial o totalmente la investigación: Universidad Politécnica Salesiana. Ecuador.

Ubicación geográfica donde se desarrolló la investigación: Laboratorio de Plasma de la Universidad Politécnica Salesiana. Cuenca. Ecuador (Calle Vieja 12-30 y Elia Liut).

Año o rango de años que la investigación abarcó: 2 años.

DNI: 0102906971

Acta de sustentación



**UNIVERSIDAD NACIONAL
MAJOR DE SAN MARCOS**
Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA

UNIDAD DE POSGRADO

ACTA DE SUSTENTACIÓN N° 09-UPG-FB-2019

**SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO
DE DOCTOR EN INGENIERÍA INDUSTRIAL**


En la ciudad de Lima, del día once del mes de julio del dos mil diecinueve, siendo las catorce horas, en acto público se instaló el Jurado Examinador para la Sustentación de la Tesis titulada: **"PROCESO DE PLASMA FRÍO A BAJA PRESIÓN Y SU INFLUENCIA EN EL NIVEL DE CONTAMINACIÓN AL REALIZAR LA LIMPIEZA DE LÁMINAS METÁLICAS"**, para optar el Grado Académico de Doctor en Ingeniería Industrial.

Luego de la exposición y absueltas las preguntas del Jurado Examinador se procedió a la calificación individual y secreta, habiendo sido Aprobada con la calificación de 12 (Muy Buena).

El Jurado recomienda que la Facultad acuerde el otorgamiento del Grado Académico de Doctor en Ingeniería Industrial, al Mg. LÓPEZ LÓPEZ LUIS MARCELO.

En señal de conformidad, siendo las 15:30 horas se suscribe la presente acta en cuatro ejemplares, dándose por concluido el acto.

 Dr. TIMOCO GÓMEZ, OSCAR RAFAEL <i>Presidente</i>	 Dr. SANTOS DE LA CRUZ BUSTOZO GUILLERMO <i>Miembro</i>
 Dr. CHUNG PINZAS, ALFONSO RAMÓN <i>Miembro</i>	 Dr. ÁLVAREZ MERINO, JOSÉ CARLOS <i>Miembro</i>


Dra. VILLAVICENCIO RAMÍREZ ILSE JANINE
Asesora

Dedicatoria

A mi familia y amigos especiales en mi vida, no son nada más y nada menos que un conjunto de seres queridos, benefactores de importancia inimaginable en mis circunstancias de ser humano. No podría sentirme más feliz con la confianza puesta sobre mi persona, especialmente cuando he contado con su total apoyo desde que tengo memoria.

Este nuevo logro es en gran parte gracias a ustedes; he logrado concluir con éxito un proyecto que en un principio podría parecer una tarea titánica e interminable. Quisiera dedicar mi tesis a ustedes, personas de bien, seres que ofrecen amor, bienestar y los finos deleites de la vida, en especial a mi esposa e hijos que son mi inspiración en todo lo que hago y a mis padres que me encaminan por el buen sendero y son sinónimo de sabiduría.

Agradecimientos

A la culminación de esta ardua investigación y llena de dificultades, es para mí un verdadero placer utilizar este espacio para exponer mis agradecimientos, de manera muy especial y sincera a la Doctora Ilse Janine Villavicencio Ramírez por realizar este proyecto bajo su dirección. Su apoyo y confianza en mi trabajo y su capacidad para guiar mis ideas han sido un aporte invaluable, no solamente en el desarrollo de esta tesis, sino también en mi formación como investigador.

Un agradecimiento a la Empresa Indurama por el apoyo en el desarrollo de la investigación desde el año 2012, haciendo posible presentar una alternativa tecnológica en su proceso productivo.

También, de manera especial agradezco a mis docentes, a mis compañeros y a los miembros del grupo de investigación GiMaT por ser parte de mi formación que apoyaron con su confianza y consejos en la culminación de este proyecto que me permite obtener mi título de Doctor en Ingeniería Industrial

Índice general

Acta de sustentación	I
Dedicatoria	II
Agradecimientos	III
Resumen	XIII
Abstract	XIV

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Situación problemática	1
1.2 Formulación del problema	4
1.2.1 Problema general	4
1.2.2 Problemas específicos	4
1.3 Justificación de la investigación	5
1.3.1 Justificación teórica	5
1.3.2 Justificación práctica	6
1.4 Objetivos	6
1.4.1 Objetivo general	6
1.4.2 Objetivos específicos	7

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 Marco Filosófico o epistemológico de la investigación	8
2.2 Antecedentes de investigación	12

2.2.1	Comparación y/o dualidad tecnológica	15
2.3	Bases teóricas	17
2.3.1	Ángulo de contacto	18
2.3.2	Energía libre superficial	22
2.3.3	Definición de plasma	26
2.3.4	Producción y composición del plasma	28
2.3.5	Clasificación de los plasmas	28
2.3.6	Aplicaciones generales de la tecnología plasma	32
2.3.7	Aspectos ambientales	40
2.3.8	Generador de Plasma frío a baja presión	42
2.3.8.1	Efectos en las superficies asociados a los tratamientos con plasma (gas ionizado)	42

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

3.1	Hipótesis general	46
3.2	Hipótesis específicas	46
3.3	Identificación de variables	47
3.3.1	Variables de la hipótesis general	47
3.3.2	Variables de hipótesis específicas	47
3.4	Operacionalización de variables	49
3.5	Matriz de consistencia	50
3.6	Tipo y diseño de investigación	55
3.6.1	Tipo de investigación	55
3.6.2	Diseño de investigación	57
3.7	Unidad de análisis	58
3.8	Población de estudio	59
3.9	Tamaño de la muestra	61
3.9.1	Número de placas	61
3.10	Selección de la muestra	63

3.11	Teoría de errores	63
3.12	Técnicas de recolección de datos para determinar el nivel de contaminación con relación al volumen de aceite	65
3.12.1	Equipos y materiales	67
3.12.1.1	Generador de plasma frío a baja presión	67
3.12.1.2	Láminas metálicas	70
3.12.1.3	Aceite lubricante	71
3.12.1.4	Gases generadores del plasma	72
3.12.1.5	Equipo analizador de gases	75
3.12.2	Protocolos de experimentación en la determinación de los gases generados	78
3.12.3	Análisis e interpretación de los datos	81
3.12.4	Prueba de hipótesis	83
3.13	Técnica de recolección de datos para determinar el nivel de contaminación con relación al ángulo de contacto	87
3.13.1	Equipos y materiales	89
3.13.1.1	Goniómetro Digital	89
3.13.1.2	Líquidos para la determinación del ángulo de contacto	89
3.13.2	Protocolos de experimentación en la determinación del ángulo de contacto	92
3.13.3	Análisis e interpretación de los datos	94
3.13.4	Prueba de hipótesis	96
3.14	Técnica de recolección de datos para determinar el nivel de contaminación con relación al volumen de aceite y el ángulo de contacto	98
3.14.1	Análisis e interpretación de los datos	98
3.14.2	Prueba de hipótesis	99

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1	Análisis del nivel de contaminación por plasma frío a baja presión en la limpieza de láminas metálicas utilizadas en productos de línea blanca de acuerdo al volumen de aceite contaminante	103
4.1.1	Análisis, interpretación y discusión de los resultados	110
4.1.2	Pruebas de hipótesis 1	112
4.1.3	Presentación de resultados y toma de desición	113
4.2	Influencia del ángulo de contacto obtenido en la limpieza de láminas metálicas con plasma frío a baja presión utilizadas para productos de línea blanca en el nivel de contaminación	121
4.2.1	Gases generados con diferentes ángulos de contacto	121
4.2.2	Nivel de contaminación de los gases generados a un ángulo de contacto de 16°	123
4.2.3	Nivel de contaminación de los gases generados a un ángulo de contacto de 36°	130
4.2.4	Nivel de contaminación de los gases generados a un ángulo de contacto de 53°	137
4.2.5	Pruebas de hipótesis 2	145
4.2.6	Presentación de resultados y toma de desición	146
4.3	Incidencia del volumen de aceite y el ángulo de contacto en el nivel de contaminación generado por el plasma frío a baja presión en la limpieza de láminas metálicas utilizadas para productos de línea blanca	153
4.3.1	Presentación de resultados y toma de desición	155
	CONCLUSIONES	166
	RECOMENDACIONES	168
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	176
	ANEXOS	177

Lista de Cuadros

2.1	Muestra de indicadores	12
2.2	Ventajas y limitaciones de la tecnología plasma	27
2.3	Limpieza superficial por plasma	34
2.4	Activación superficial por plasma	36
2.5	Recubrimientos por chorros de plasma	37
2.6	Recubrimiento por plasma (PECVD)	38
3.1	Operacionalización de la variable: Volumen de aceite	51
3.2	Operacionalización de la variable: Gases generados	52
3.3	Operacionalización de la variable: Ángulo de contacto	53
3.4	Matriz de consistencia lógica	54
3.5	Unidad de análisis	58
3.6	Población de estudio	59
3.7	Población de estudio	60
3.8	Población de estudio: número de placas.	61
3.9	Parámetros del equipo de plasma	69
3.10	Composición química de las muestras	71
3.11	Características del lubricante LUBE HD—2	72
3.12	Componentes de la energía libre superficial (mN/m) para los líquidos de prueba	91
4.1	Parámetros del generador de plasma	104
4.2	Gases generados en la limpieza superficial.	104
4.3	Dispersión de los datos obtenidos	111

4.4	Datos para el coeficiente r_{xy} de Pearson para el CO	113
4.5	Correlación: volumen del aceite y monóxido de carbono	115
4.6	Datos para el coeficiente r_{xy} de Pearson para el CO ₂	116
4.7	Correlación: volumen del aceite y dióxido de carbono	117
4.8	Datos para el coeficiente r_{xy} de Pearson para los hidrocarburos HC	119
4.9	Correlación: volumen del aceite - hidrocarburos	120
4.10	Ángulos de contacto para análisis de gases	122
4.11	Parámetros del generador para un ángulo de 16°	123
4.12	Nivel de los gases a un ángulo de 16°	124
4.13	Parámetros del generador para un ángulo de 36°	130
4.14	Nivel de los gases a un ángulo de 36°	131
4.15	Parámetros del generador para un ángulo de 53°	137
4.16	Nivel de los gases a un ángulo de 53°	138
4.17	Dispersión de los datos obtenidos	144
4.18	Datos del monóxido de carbono a diferentes ángulos	146
4.19	Rangos y estadísticos de prueba CO	147
4.20	Datos del dióxido de carbono a diferentes ángulos	149
4.21	Rangos y estadísticos de prueba CO ₂	149
4.22	Datos de hidrocarburos a diferentes ángulos	151
4.23	Rangos y estadísticos de prueba HC	152
4.24	Datos de monóxido de carbono a diferentes ángulos y volúmenes	156
4.25	Resumen del modelo CO	156
4.26	Análisis Anova CO	158
4.27	Análisis de coeficientes CO	159
4.28	Datos de dióxido de carbono a diferentes ángulos y volúmenes	160
4.29	Resumen del modelo CO ₂	160
4.30	Análisis Anova CO ₂	161
4.31	Análisis de coeficientes CO ₂	162
4.32	Datos de hidrocarburos a diferentes ángulos y volúmenes	163
4.33	Resumen del modelo HC	163

4.34	Análisis Anova HC	164
4.35	Análisis de coeficientes HC	165

Lista de Figuras

2.1	Ángulo de contacto	19
2.2	Efectos del ángulo de contacto	19
2.3	Mojabilidad de un líquido	20
2.4	Evaluación del ángulo de contacto	21
2.5	Variaciones del ángulo de contacto	22
2.6	Fuerzas atractivas que actúan sobre las moléculas en el seno de un líquido y en la superficie libre	24
2.7	Representación del plasma como cuarto estado de la materia	26
2.8	Esquema de proceso de ionización y de transferencia de energía de átomos o moléculas mediante un campo eléctrico (E) y electrones acelerados . . .	29
2.9	Principales efectos del plasma en la superficie	43
2.10	Esquema de activación superficial	43
2.11	Esquema de limpieza agresiva superficial	44
2.12	Esquema de limpieza superficial	44
2.13	Esquema de deposición superficial	45
3.1	Diseño de investigación	57
3.2	Peso de las placas de acero	61
3.3	Generador de plasma	68
3.4	Componentes del generador de plasma	69
3.5	Cámara de generación de gas ionizado	70
3.6	Placa metálica	71
3.7	Botella o cilindro de oxígeno	73
3.8	Botella o cilindro de argon	74

3.9	Equipo analizador de gases QROTECH Modelo QGA 6000	75
3.10	Diagrama del método NDIR	77
3.11	Diagrama del método electroquímico	77
3.12	Conexión del analizador	78
3.13	Procedimiento para detectar los gases generados	79
3.14	Variables que intervienen en el análisis de datos	82
3.15	Correlación de Pearson	85
3.16	Goniómetro digital	89
3.17	Líquidos para determinar el ángulo de contacto	90
3.18	Pipetas mecánicas de canal simple de volumen controlable	91
3.19	Procedimiento para determinar el ángulo de contacto	92
3.20	Variables que intervienen en el análisis de datos	95
4.1	Variables en la determinación del nivel de contaminación	103
4.2	Correlación de las variables: Volumen - %CO	115
4.3	Correlación de las variables: Volumen - %CO ₂	118
4.4	Correlación de las variables: Volumen - Hidrocarburos	121
4.5	Variables en la determinación del nivel de gases generados	123
4.6	Análisis de cajas CO	148
4.7	Análisis de cajas CO ₂	150
4.8	Análisis de cajas HC	153
4.9	Incidencia de las variables en el nivel de contaminación	155

Resumen

La presente investigación aborda un análisis del nivel de contaminación de los gases producidos por un proceso de limpieza de láminas metálicas alternativo para productos de línea blanca aplicando plasma frío a baja presión que consta de un flujo combinado de gases inertes ionizados bajo ciertas condiciones para extraer el aceite lubricante de la superficie utilizado en el proceso de conformado. En la planta de producción se seleccionaron muestras con diferentes volúmenes de aceite en la superficie que posteriormente fueron sometidas a una descarga de plasma de argón y oxígeno para determinar la correlación con los niveles de los gases generados por la descarga, manteniendo constante el grado de limpieza interpretado por el ángulo de contacto. Posteriormente se realizó un análisis entre el grado de limpieza de la superficie metálica representada por el ángulo de contacto y los niveles de los gases generados por la descarga del plasma o gas ionizado, manteniendo constante el volumen del aceite lubricante sobre la superficie.

Abstract

The current investigation approaches an analysis of the level of contamination of the gases produced by an alternative metal sheet cleaning process for white goods applying cold plasma at low pressure that consists of a combined flow of inert ionized gases under certain conditions to extract the lubricating oil from the surface used in the forming process. In the production plant, samples were selected with different volumes of oil on the surface that were subsequently subjected to a plasma discharge of argon and oxygen to determine the correlation with the levels of the gases generated by the discharge, keeping a constant degree of cleanliness interpreted by the contact angle. Subsequently an analysis was made between the degree of cleanliness of the metallic surface represented by the contact angle and the levels of the gases generated by the discharge of the plasma or ionized gas, keeping the volume of the lubricating oil as a constant on the surface.

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1. Situación problemática

En la actualidad, el desarrollo económico y social está directamente relacionado con el desarrollo del sector industrial, que según indica la Asociación de Industriales Latinoamericanos AILA (2016), facilita la modernización de los países al recibir transferencia tecnológica y buenas prácticas para los diferentes procesos productivos y que es el sector con mayor inversión e innovación que mejora la competitividad de los países y la región. También es necesario manifestar que la compleja integración del desarrollo industrial con la transferencia tecnológica está actualmente asociado a políticas ambientales a favor de la conservación de la naturaleza con el fin de tener un crecimiento socialmente equilibrado en términos de un desarrollo sostenible (Samaniego, 2006).

Como indica Lira (2018), uno de los sectores industriales en crecimiento en la región son las empresas de productos en línea blanca, que se enmarcan en un compromiso de protección al medio ambiente con políticas y compromisos que muestren empresas preocupadas en un desarrollo sostenible que permitan generar una imagen responsable ante la sociedad. Como indican Dow Corning Plasma Solutions (2006) y el Ministerio del Medio Ambiente y FUNDES (2016), algunas de las actividades productivas de estas empresas no están enmarcadas en las políticas de protección ambiental como es el caso de la limpieza de láminas metálicas por medio de baños de decapado que ocasionan daños a la salud, infraestructura y medio ambiente, mediante emisiones ácidas y gases nitrosos altamente tóxicos. La mayoría de estos baños son ácidos que contienen aditivos inhibidores de la corrosión y

tensoactivos (sustancia que presentan actividad en las superficies reduciendo la superficie del líquido en el que esta disuelto), que a su vez estabilizan los baños, consiguiendo alargar la vida de los mismos. Existe una amplia gama de aditivos cuyos efectos sobre el medio ambiente deben ser analizados (Ipek y colaboradores, 2005). La acumulación de algunos metales pesados como el zinc, cobre y el cromo en algunos baños de decapado, que en teoría podrían pasar bien como sustancias suspendidas o a los fangos de alguna depuradora industrial que representan otra problemática ambiental considerable (Frias y Perez, 1998; Ken, 2000). Investigadores como Berdún (2002); López y colaboradores (1998), también manifiestan que en los procesos tradicionales de limpieza superficial de láminas metálicas a través de la inmersión en baños ácidos presenta múltiples problemas ambientales como emisiones, vertidos alcalinos a fuentes hídricas, vapores con partículas a la atmósfera y ácidos con metales junto con los lodos de decapado en la contaminación de suelos. Según Cano y colaboradores (2004); López y colaboradores (1998); Villalobos y colaboradores (1990) los procesos de desengrase y decapado ocasionan daños severos a la salud, las infraestructuras y medio ambiente. Los baños en caliente producen emisiones ácidas y de gases nitrosos, éstos últimos son de carácter altamente tóxico. Los decapados de clorhídrico concentrado pueden generar gases especialmente cuando operan a alta temperatura (OMS, 2008). Además Blasco (2012) y Carrillo (2014), indican que estudios recientes en limpieza de láminas metálicas proponen una mejor eficiencia de los químicos utilizados en procesos tradicionales de decapado, sin embargo, el nivel de contaminación persiste, simplemente se prolonga la utilidad de los mismos.

El uso del proceso tradicional no ha podido ser remplazado por los resultados obtenidos en el grado de limpieza y por los bajos costos de producción hasta los inicios de siglo, donde investigadores como Ma y colaboradores (1998), realizaron estudios que indican la eficiencia de la limpieza de láminas metálicas dentro del proceso de desengrase y decapado viene determinado por la energía libre superficial que depende directamente del ángulo de contacto formado por un líquido y la superficie analizada que depende de diversas condiciones propias de cada proceso. Bajo éste principio se ha desarrollado una tecnología relativamente nueva que sigue en avances para la mejora en generación de plasma frío

a baja presión, donde su aplicación en la limpieza de láminas metálicas contaminadas con aceites presenta resultados satisfactorios como manifiesta (Sarmiento y colaboradores, 2012), donde se utiliza gases no contaminantes de fácil manipulación (Kwok y Neuman, 1999), a fin de remover todos los residuos indeseados como óxidos o contaminantes tanto mecánicos como orgánicos, por lo tanto, de la efectividad de éste tratamiento, dependerá la propiedad adhesiva del material y el ángulo de contacto directamente relacionado con la energía libre superficial de las superficies o el grado de limpieza de la misma (Njobuenwu y colaboradores, 2007a; Zenkiewicz, 2007). El principio de la generación de plasma frío a baja presión y su aplicación directa y específica en la limpieza de láminas metálicas presenta una nueva alternativa, sin embargo, no existen estudios del impacto ambiental que puede ocasionar su uso; de tal manera, es relevante establecer el mismo antes que se presente como una alternativa a un proceso industrial tradicional.

En la ciudad de Cuenca - Ecuador se encuentran las plantas de producción de las empresas de línea blanca Induglob (Indurama como marca comercial para cocinas a gas y refrigeradores) y Fibro Acero que elaboran el 90 % de los electrodomésticos para consumo nacional, según datos del Ministerio de Producción (El mercurio, 2013). Las leyes de control ambiental en Ecuador y específicamente en la ciudad de Cuenca a través de sus ordenanzas municipales son exigentes en los tratamientos de las aguas residuales por cada empresa previo a la descarga a las lagunas de oxigenación, donde se tratan las mismas antes de su regreso al efluente natural. Los costos de tratamiento de las aguas residuales contaminadas con ácidos representan un valor elevado y los químicos utilizados (tenso - activos) son igual de contaminantes que los ácidos bases (baños de decapado) y además reducen considerablemente la vida útil de la infraestructura civil que tratan estos residuos. Según indica Ministerio del Ambiente (2015), el aumento de la contaminación ambiental de una empresa y la falta de tratamientos de los residuos generados por su actividad productiva son penadas por el incumplimiento a la normativa vigente. En materia ambiental existe incentivos económicos al manejo ambiental de una empresa establecidos en las leyes correspondientes de acuerdo con la Autoridad Ambiental Nacional. Los reconocimientos al mérito ambiental, al proceso productivo de servicios y comercialización en su conjunto son reconocidas en la Legislación Ambiental del Ecuador.

1.2. Formulación del problema

En la actualidad con el avance tecnológico de generación de plasma frío a baja presión se ha logrado alcanzar y mejorar los índices de energía libre superficial en la limpieza de láminas metálicas, pero no se ha determinado su nivel de contaminación ambiental. En este contexto el problema se embarca en la relación del grado de limpieza de las láminas metálicas con el nivel de contaminación generado por la generación de plasma y así aceptar como una tecnología más limpia y amigable con el ambiente que pueda ser una alternativa al proceso tradicional de limpieza por inmersión en baños de ácidos.

1.2.1. Problema general

¿Cuál es el nivel de contaminación en el proceso de limpieza de láminas metálicas con plasma frío a baja presión a través del ángulo de contacto?

1.2.2. Problemas específicos

a) ¿Cuál es el nivel de contaminación por plasma frío a baja presión en la limpieza de láminas metálicas utilizadas en productos de línea blanca de acuerdo al volumen de aceite contaminante?

b) ¿De qué manera el ángulo de contacto obtenido en la limpieza de láminas metálicas con plasma frío a baja presión y utilizadas para productos de línea blanca influye en el nivel de contaminación?

c) ¿De qué manera la interacción del volumen de aceite y el ángulo de contacto inciden en el nivel de contaminación generado por el plasma frío a baja presión en la limpieza de láminas metálicas utilizadas para productos de línea blanca?

1.3. Justificación de la investigación

1.3.1. Justificación teórica

El desarrollo industrial sostenible genera la búsqueda de conocimientos, indagación de soluciones e interrogantes que a través de una investigación científica de forma sistemática y metodológica tiene por finalidad desarrollar o mejorar un proceso productivo, de manera que no provoque un impacto ambiental o este sea el mínimo posible. El uso de mejores técnicas en procesamiento relacionadas con la limpieza de superficies metálicas que pueden ser disponibles pretenden de forma responsable reducir la contaminación sin afectar de ninguna manera la productividad de una empresa, sino por lo contrario busca optimizar el proceso de limpieza disminuyendo el volumen de cargas residuales considerando primordial la responsabilidad social empresarial. En definitiva, la presente investigación se justificó por identificar la influencia del nivel de contaminación ambiental que produce la limpieza de láminas metálicas con una tecnología nueva como el plasma frío a baja presión que presenta los mismos o mejores resultados que el proceso tradicional de limpieza, aplicando los principios físicos químicos de la materia y sus estados, que permiten la remoción de sustancias líquidas que se encuentran sobre las superficies metálicas analizadas.

1.3.2. Justificación práctica

Al aplicar el avance de la tecnología en la generación de plasma frío a baja presión en procesos de limpieza de superficies se pretende reducir considerablemente los niveles de contaminación y costos de producción, siendo beneficiario directo las empresas que adopten ésta tecnología nueva, además de obtener incentivos gubernamentales por la reducción de la contaminación y lograr una imagen empresarial ante la sociedad por su responsabilidad con el ambiente y posicionar sus productos en los mercados nacionales e internacionales con un sello verde que indican el cumplimiento de los estándares ecológicos para los productos elaborados. La sociedad es beneficiada en las diferentes ciudades que adopten esta tecnología al eliminar las descargas por residuos líquidos contaminados al sistema de alcantarillado, alargando la vida útil de las lagunas de oxigenación, disminuyendo costos de tratamientos de aguas residuales. Las empresas que incorporen en sus líneas de producción reducirán considerablemente sus tiempos en los tratamientos superficiales de limpieza debido a que no necesitan un proceso de secado posterior, además de tener un menor porcentaje de adhesión de polvos y humedad al no estar expuesto por largos tiempos al ambiente de trabajo.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Determinar el nivel de contaminación generado en el proceso de limpieza de láminas metálicas con plasma frío a baja presión a través del ángulo de contacto.

1.4.2. Objetivos específicos

a) Analizar el nivel de contaminación por plasma frío a baja presión en la limpieza de láminas metálicas utilizadas en productos de línea blanca de acuerdo al volumen de aceite contaminante.

b) Establecer la influencia del ángulo de contacto obtenido en la limpieza de láminas metálicas con plasma frío a baja presión utilizadas para productos de línea blanca en el nivel de contaminación.

c) Analizar la incidencia del volumen de aceite y el ángulo de contacto en el nivel de contaminación generado por el plasma frío a baja presión en la limpieza de láminas metálicas utilizadas para productos de línea blanca

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

2.1. Marco Filosófico o epistemológico de la investigación

A mediados del siglo XV la praxis de la investigación venía referenciada con la experiencia para comprender los fenómenos que eran observados. Bacon (1561-1626) presenta un nuevo orden (Novum Organum) para la interpretación de lo observado y propone que las experiencias se desarrollen de distintas maneras y procedimientos donde cada una se puede modificar de acuerdo a la materia, la causa o la cantidad, es decir introduce la formulación de hipótesis alternativas; control experimental y el experimento crucial. Además, considera importante la duración de la experiencia de manera que se pueda generar una gran sutileza en un tema determinado y se pueda trasladar la experiencia a diferentes ámbitos de dominio industrial que dependerán de las circunstancias del entorno con el fin de controlar las causas de un efecto que genere utilidad a la sociedad. Es necesario recalcar que Bacon (1561-1626) presenta ciertas condiciones en sus famosas tablas donde establece la presencia de los hechos como la ausencia de ciertas circunstancias, en las que el objeto de investigación se encuentra en diferentes condiciones y se puede inducir a la naturaleza del fenómeno, que permite excluir o rechazar hechos y circunstancias para obtener una respuesta verdadera y afirmativa.

Enmarcado en la filosofía de Bacon, la aplicación de plasma frío a baja presión en diferentes procesos productivos presenta un gran potencial de uso al saber que sus aplicaciones podrían desarrollarse en diferentes ámbitos y condiciones. Al tener en la actualidad un desarrollo sobre esta tecnología, aumenta las posibilidades de uso en la limpieza superficial de láminas metálicas donde se puede aplicar de acuerdo con la necesidad y a la experiencia,

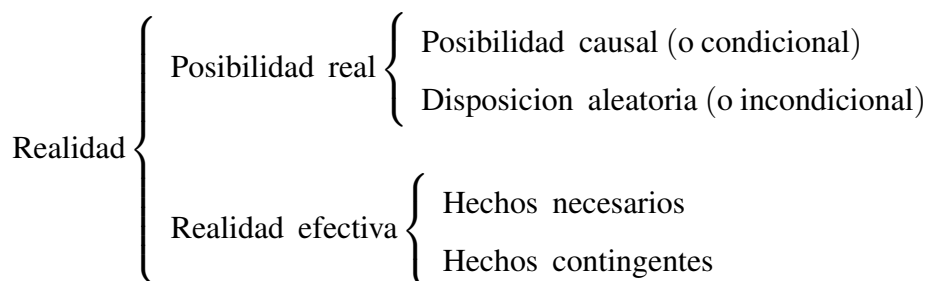
impulsando a un sistema productivo a ser más eficiente controlando las circunstancias del entorno con el fin de controlar su efecto en las láminas metálicas.

Bunge (2006), en su obra “A la casa de la realidad” indica que “ Sin ley, no hay mecanismo posible y sin mecanismo no hay explicación” donde los científicos proponen descubrir el cómo funcionan las cosas y cuáles son sus mecanismos de funcionamiento para poder obtener una explicación del evento observado y así generar un razonamiento para evaluar descubrimientos revolucionarios que son compatibles con una ley conocida, generando la búsqueda de mecanismos detrás de los hechos antes que la automática búsqueda de datos y correlaciones estadísticas entre ellos.

Es así como el cuarto estado de la materia conocido como plasma o ionización fue descubierto hace ya más de un siglo por Sir. William Crookes (1870) al calentar un gas a alta temperatura, sugirió la existencia de un cuarto estado de la materia que consistía en un gas formado por los electrones e iones resultantes de la división de átomos y moléculas individuales de dicho gas a altas temperaturas. No obstante, pasaron varias décadas hasta que Irving Langmuir (1928) denominó a este estado de la materia plasma. En estos últimos años se ha potencializado su utilización con diferentes mecanismos de generación manteniendo la misma ley constitutiva donde los átomos de un gas son excitados desprendiéndose los electrones y generándose gas ionizado (Negrete y colaboradores, 1997). Así como existen en la actualidad diferentes mecanismos de generación también existen diferentes mecanismos de aplicación que permiten generar un razonamiento para un potencial uso en la limpieza de láminas metálicas basándonos en una ley conocida para entender la rotura de los enlaces covalentes y Vanderwals de las sustancias que se encuentran sobre la superficie del metal al ser sometidos a un gas ionizado. Sin embargo la aplicación del gas podría tener diferentes efectos en las diversas sustancias que se encuentran en la lámina metálica y de igual forma podría producir diferentes cambios en las propiedades de la superficie, es así que se puede plantear diversas hipótesis y abducir a un resultado, considerando lo manifestado por Bunge (2006), donde indica que muchos estudiosos concuerdan en que la manera de dar razón de los hechos observables es formular hipótesis alternativas y luego descartar las que son falsas, idealmente por medio de experimentos cruciales (concluyentes). Esto era algo bien sabido por Francis Bacon (1620), William

Whewell (1847) y John R. Platt (1964), Charles S. Peirce (1934), Harman (1965), entre otros.

Confirmar una hipótesis de manera razonable y que pertenezca a una teoría bien corroborada y que calce con la cosmovisión predominante planteada por el investigador en este caso la limpieza superficial de láminas metálicas aplicando gas ionizado se vuelve una posibilidad de categoría ontológica es decir puede ser o no ser que se consiga una limpieza superficial idónea para la aplicación deseada, sin embargo se debe analizar profundamente la relación entre los datos obtenidos y la conjetura planteada (Bunge, 2006). Ahora, se vuelve primordial encontrar la posibilidad real de que se dé una limpieza superficial idónea en las láminas metálicas al aplicar un gas ionizado basándose aún en una proposición y no sobre un hecho (Hughes y Cresswell, 1968). Los metafísicos de los mundos posibles analizan la posibilidad (p) donde sea posible y verdadera. Sin embargo, no se molestan en caracterizar de manera precisa tales mundos en cuestión violan las leyes de la naturaleza conocidas, la correspondiente posibilidad conceptual puede ser realmente imposible, en el caso planteado existe una ley natural en la que se basa en una ley química para la síntesis de moléculas a partir de átomos para generación y posibles aplicaciones de gas ionizado. Bajo este concepto nos concentraremos en la posibilidad real, en las ciencias y tecnologías que se basa en una posibilidad técnica de factibilidad y una posibilidad natural que se enmarca en la compatibilidad con las leyes de la naturaleza. Si admitimos la categoría de posibilidad real, se debe expandir el concepto de realidad y, con ello, nuestra cosmovisión, para incluir hechos posibles, junto con los hechos efectivos, los cuales a su vez pueden ser necesarios o contingentes que confirman la posibilidad real que demuestran la hipótesis de existencia, adoptando la siguiente visión (Bunge y Mahner, 2004).



Donde se puede establecer que la realidad de un evento que tenga compatibilidad con las leyes naturales involucra la relación entre la posibilidad real y realidad efectiva para evitar confusiones, error y paradoja. Es así que Bunge (2006), en su filosofía de los puentes entre la teoría y hecho, contrastadas en las teorías científicas determina que las consecuencias observables se deducen y se comparan con los resultados pertinentes de la observación que procede de la siguiente manera:

- Se deducen las consecuencias observables de la teoría
- Se obtienen los datos
- Se confrontan las predicciones con los datos
- Se evalúa la teoría

Este esquema, llamado método hipotético – deductivo, es común tanto a los empiristas (inductivistas) y a los racionalistas (deductivistas), en particular para Karl Raimund Popper, establece que se debe mantener un criterio para deslindar lo científico del supuesto planteado, de manera que se pueda generar hipótesis científicas falsables a través de observaciones experimentales. Sin embargo, manifiesta que contiene una importante parte de verdad pero también es gravemente defectuoso, puesto que las teorías no implica observaciones así sin más y, en consecuencia, no pueden ser contrastadas de modo directo con los datos obtenidos pertinentes, es decir un dato puede ser poco confiable si no tiene una relación directa entre lo que se pretende indicar (indicado) y lo observado (indicador), como se presenta en el ejemplo del cuadro 2.1, donde se indica claramente que los datos obtenidos no representan directamente lo que se pretende observar y la relación entre la teoría y el hecho necesita mucha investigación para ser exitosa y es necesario tener claro que para obtener una superficie limpia en una lámina metálica se debe mantener claro la relación entre lo esperado y lo calculado partiendo de las observaciones realizadas.

Cuadro 2.1: **Muestra de indicadores.**

Indicado	Indicador
Temperatura	Altura de la columna termométrica
Intensidad de corriente	Desviación de la aguja del amperímetro
Limpieza de la lámina	Energía libre superficial que a su vez depende del ángulo de contacto entre la superficie y un líquido

Adaptado de: Bunge (2006)

2.2. Antecedentes de investigación

En la actualidad el nivel de contaminación ambiental producida por los procesos de limpieza y activación de la superficie metálica a través de procesos químicos es muy alarmante por los procesamientos posteriores que se deben dar a los líquidos residuales que contienen una gran cantidad de ácidos bases, tensoactivos y materiales pesados (lodos de decapado); se han desarrollado sistemas que recuperan casi la totalidad de los ácidos bases, pero se ha incrementado el uso de tenso - activos y de lodos de decapado con materiales pesados que son en la mayoría de las veces desechados directamente a los efluentes y vertederos de la ciudad (Frias y Perez, 1998; López y colaboradores, 1998; Villalobos y colaboradores, 1990).

Generalmente, la función de las estructuras de acero es de soportar diversos tipos de cargas, por lo que una exposición prolongada puede dar lugar a daños en la integridad de la estructura con el consiguiente costo de reparación y/o sustitución. El empleo de la pintura inhibe el proceso de la corrosión, se puede aplicar sobre superficies muy diversas y de complicadas formas, aislando el metal de los agentes climáticos u otros factores que producen degradación del material desnudo. Por lo general las pinturas actúan formando una

barrera protectora contra la acción del oxígeno y otros elementos agresivos que provocan reacciones sobre el hierro formando óxido, por tal motivo antes de pintar debe darse un tratamiento superficial al metal (Simancas y Morcillo, 1998).

González (1999), establece en sus investigaciones que el comportamiento y la durabilidad de cualquier revestimiento de pintura se ven significativamente afectados por la preparación y limpieza de la superficie a tratar. en el caso de las estructuras de acero, esto es todavía más importante pues resulta que la limpieza y selección del método de preparación de la superficie asume una importancia muy relevante en cualquier tratamiento anticorrosivo. En las industrias de línea blanca, el tratamiento superficial se ocupa de limpiar las superficies metálicas, protegerlas contra la corrosión y mejorar su aspecto superficial. El acero es hasta el momento el metal más utilizado en el mundo, satisface la mayor parte de las necesidades requeridas en las principales industrias en términos de calidad técnica y económica, sin embargo, existen una serie de limitaciones siendo la más representativa la baja resistencia a la corrosión en el medio ambiente, pudiendo aparecer cubierto de óxido en pocos días e incluso horas después de su exposición a la humedad (Blasco, 2012; Navrátil y colaboradores, 2004).

Una solución a esta contaminación es el uso de sistemas mecánicos para la limpieza y activación de superficies sin embargo produce cambios de rugosidad que causan un elevado cambio estructural que posteriormente da lugar a la degradación y pérdida de funcionalidad de la capa de recubrimiento, sumado a los costos y tiempos de producción que no permiten ser implementados en las industrias que tienen niveles de producción elevados como es el sector de productos de línea blanca (Rodríguez, 2014).

El avance de la tecnología como el uso de generadores de plasma aplicados a la limpieza y modificación superficial en metales presenta una posible solución a los problemas ambientales provocados por los métodos tradicionales esperando no perjudicar los tiempos del proceso y que presente una igual eficacia en los resultados requeridos. En estudios realizados por Plasmatrete (2019) al igual que Angostino y colaboradores (2005), determinan que

el plasma aplicado a ciertas superficies como algodón, telas, polímeros y metales merman considerablemente su ángulo de contacto aumentando su hidrofobicidad que representa la limpieza de un material y su energía libre superficial.

Angostino y colaboradores (2005), manifiestan que la tecnología con plasma tiene un futuro prometedor en diversas aplicaciones industriales y cada vez se desarrollan avances que mejoran cada proceso ya sea en limpieza, deposición, esterilización, activación superficial, entre otros. Los tratamientos con baja presión presentan bajos costos económicos por lo que el proceso será muy solicitado y con el avance cada vez más acelerado de los microelementos electrónicos será económicamente más accesible como de fácil uso, además sectores industriales como el textil tiene un gran crecimiento y el plasma se presenta como un sistema efectivo para el tratamiento hidrofóbico de las fibras y las exigencias comerciales de la Unión Europea en especial de Alemania junto con Japón, China y Korea en el control de la contaminación reconocen la importancia de la contribución del proceso plasma a la conservación del planeta.

Pauwels (2013), ha trabajado en la modificación superficial de láminas poliméricas variando las variables de generación de plasma encontrando resultados que permiten una mejor adherencia de tintes. Existen diversos estudios de modificación superficial en metales donde Sarmiento y colaboradores (2012) junto con Korsec y colaboradores (1994), presentan la limpieza de una lámina metálica con uso de plasma frío a baja presión, estableciendo parámetros específicos de acuerdo a la composición química del material en estudio y del tipo de contaminante en la superficie, considerando la tecnología plasma como potencial proceso de limpieza amigable con el ambiente para diversas superficies. Nickerson (1998), indica que la presencia de una contaminación orgánica impide una adhesión adecuada y el plasma con oxígeno es excelente para eliminarla y se usa con ese propósito ya que provoca una reacción química que resulta en su volatilización y eliminación, también considera que se debe seleccionar correctamente los parámetros del proceso para garantizar la eliminación por completo de los contaminantes y que no exista una capa de barrera para que la adhesión falle o disminuya, siendo un parámetro crítico la potencia de manera que el campo de

energía generado provoque que el oxígeno (O_2) o dióxígeno se descomponga en un oxígeno monoatómico (O) y a una presión mínima de 0,1 Torr (1 atmósfera = 760 Torr \approx 100 kPa) de manera que se pueda combinar fácilmente con cualquier componente orgánico (compuestos a base de C y C- H) facilitando la combinación en vacío con hidrocarburos que resulta en la descomposición formando vapor de agua, CO y CO_2 , la reacción por naturaleza debe ser completa sin residuos.

Hirth (2012) como Reichel y Fellenberg (2001), indican en sus investigaciones que las partículas de plasma cambian dramáticamente cuando entran en contacto con un material donde se generan pérdidas de carga y la energía se transfiere en el tratamiento superficial, es decir, los componentes moleculares de la superficie o los que están sobre ella sufren un cambio de acuerdo al tratamiento superficial donde los gases elegidos desempeñan un papel fundamental. Afirman que el plasma es una ciencia y tecnología joven, que aún no ha alcanzado su máximo potencial en nuevas aplicaciones.

2.2.1. Comparación y/o dualidad tecnológica

El proceso de limpieza de láminas metálicas con plasma frío a baja presión presenta una alternativa a los procesos utilizados tradicionalmente; donde la presencia de ácidos como bases considerados tóxicos y nocivos para la salud y medio ambiente a tenido un incremento considerable por la demanda de productos de línea blanca debido al crecimiento poblacional y por políticas de renovación por nuevos productos con mayor eficiencia energética y avances tecnológicos. Gordillo (2008) afirma:

Gracias a los plasmas fríos, ciertos procesos industriales se realizan de forma más eficiente y barata, con lo que se reducen la contaminación y los residuos tóxicos generados. Las ventajas del uso industrial de plasmas fríos quedan perfectamente ilustradas en la comparación que W. Rakowski publicó en 1989

entre los recursos necesarios para teñir tejidos de algodón con un método químico corriente, que use cloro, y los que requieren un procedimiento igualmente eficaz, pero que se vale de plasmas fríos a baja presión (2,5-7 mbar). La modificación de 120 toneladas/año de lana mediante el segundo método suponía un ahorro de 27.000 m³ de agua, 44 toneladas de hipoclorito sódico, 16 toneladas de bisulfito sódico, 11 toneladas de ácido sulfúrico y 685 megawatt de potencia eléctrica. Por otra parte, el proceso químico ordinario producía residuos tóxicos causantes de diferentes enfermedades en los trabajadores. La comparación de los costes energéticos de producir un kilogramo de tejidos de lana teñible arrojaba unas cifras de 7 kilowatt/kg para el proceso de clorado tradicional frente a sólo 0,3 o 0,6 kilowatt/kg cuando se recurre al tratamiento con plasmas fríos producidos a baja presión. (p. 74)

Investigadores como Albella (2003) indican que:

En los últimos años, la tecnología de recubrimientos y capas delgadas ha alcanzado un fuerte desarrollo debido a la gran variedad de aplicaciones, que van desde los recubrimientos protectores y decorativos utilizados en la industria mecánica y del automóvil hasta las capas selectivas empleadas en paneles arquitectónicos, filtros ópticos, incluyendo las películas semiconductoras, optoelectrónicas y magnéticas, etc. Todo este desarrollo ha sido posible gracias a los avances recientes, tanto en la tecnología de vacío como en las técnicas de deposición, de análisis de superficies y de caracterización eléctrica, mecánica y óptica.

Las dos tecnologías de limpieza presentan una contaminación del aire y cada vez más preocupante para la salud humana y del medio ambiente, los residuos que se liberan a la atmósfera son muy diversos desde óxidos nitrosos (NO_x), compuestos orgánicos volátiles (VOCs), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), óxidos de azufre (SO_x), Hidrocarburos (HC) como el metano (CH₄) que contribuye al efecto invernadero entre otros,

que por traslados de los vientos y reacciones químicas con la humedad del aire pueden formar ácidos sulfúricos y nítricos (en los casos de SO_x y NO_x respectivamente, que se precipitan en forma de lluvia ácida. Para adoptar una tecnología plasma depende de muchos factores y políticas para su aplicación, considerando que las dos tecnologías presentan los mismos resultados en la limpieza de láminas metálicas (Sauthier, 2012). Sin embargo, se considera que la tecnología plasma jugará un rol muy importante en un futuro próximo en la producción de bienes más duraderos con mejores resultados industriales reduciendo costos de producción y alcanzando objetivos primordiales a favor de la reducción de la contaminación en beneficio de la sociedad (Saettone, 2010).

2.3. Bases teóricas

En las industrias de línea blanca el tratamiento superficial se ocupa de limpiar las superficies metálicas, protegerlas contra la corrosión, y mejorar el aspecto superficial. El acero es hasta el momento el metal más comúnmente utilizado hoy en día en el mundo. Satisface la mayor parte de las demandas de las principales industrias en términos de calidad técnica y económica, sin embargo, existen una serie de limitaciones, así, los aceros comunes no son resistentes a la corrosión, factores meteorológicos tales como la temperatura, humedad relativa y tiempo de humectación de la superficie metálica favorecen a la misma y las estructuras de acero no protegidas aparecerán cubiertas de óxido en varios días, e incluso horas después de su exposición a la humedad. Generalmente, la función de las estructuras de acero es la de soporte de la carga, por lo que una exposición prolongada puede dar lugar a daños en la integridad de la estructura y aspecto visual con el consiguiente coste de reparación y/o sustitución (Chico y colaboradores, 2014).

El empleo de pintura inhibe el proceso de corrosión, se puede aplicar sobre superficies de muy diversas y complicadas formas, aislando el metal de los agentes climáticos u otros

factores que producen degradación del material desnudo. Por lo general las pinturas actúan formando una barrera protectora contra la acción del oxígeno y otros elementos agresivos que provocan reacciones sobre el hierro formando óxido, por tal motivo antes de pintar debe darse un tratamiento a la superficie.

La norma ISO (2011), referente a la protección anticorrosiva de acero mediante pintura, establece que el comportamiento y la durabilidad de cualquier revestimiento de pintura se ven significativamente afectados por la preparación y limpieza de la superficie a tratar. En el caso de estructuras de acero, esto es todavía más importante pues resulta obvio que la limpieza y selección del método de preparación de la superficie asume una importancia muy relevante en cualquier tratamiento anticorrosivo.

2.3.1. Ángulo de contacto

Algunos autores expresan que el ángulo de contacto estático se refiere al ángulo formado entre la superficie de un líquido específico con la superficie de un sólido, el valor del ángulo depende principalmente de las fuerzas adhesivas entre el sólido y el líquido, cuando las mismas son grandes el ángulo formado es menor a 90° y se considera que el líquido moja la superficie.

También Kwok y Neuman (1999), definen el ángulo de contacto como el ángulo existente o formado entre la superficie sólida y la línea tangente a la gota trazada en el límite de las tres fases, donde el líquido junto con el sólido y el gas interactúan, como se muestra en la figura 2.1.

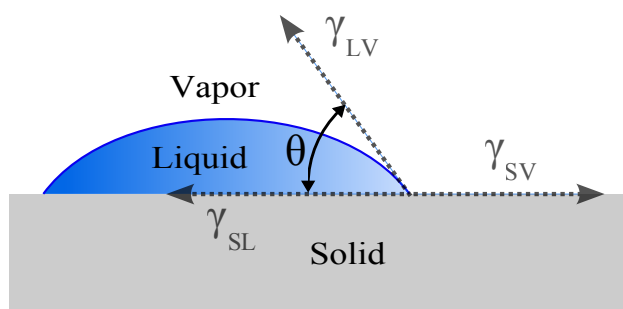


Figura 2.1: **Ángulo de contacto.** Fuente: Gillis (2006)

El valor del ángulo de contacto estático entre una gota de líquido con una tensión superficial conocida y una superficie sólida, depende de las fuerzas adhesivas entre el líquido y el sólido haciendo que las fuerzas cohesivas de la gota se contraigan adoptando una forma esférica hasta alcanzar una condición de equilibrio (Neto y colaboradores, 2007). El ángulo en el interior del fluido más denso (aquí, θ) se define como el ángulo de contacto y su mojabilidad como se puede observar en la figura 2.1. Se considera que una superficie con mayor mojabilidad es hidrofílica y con menor mojabilidad es hidrofóbica.

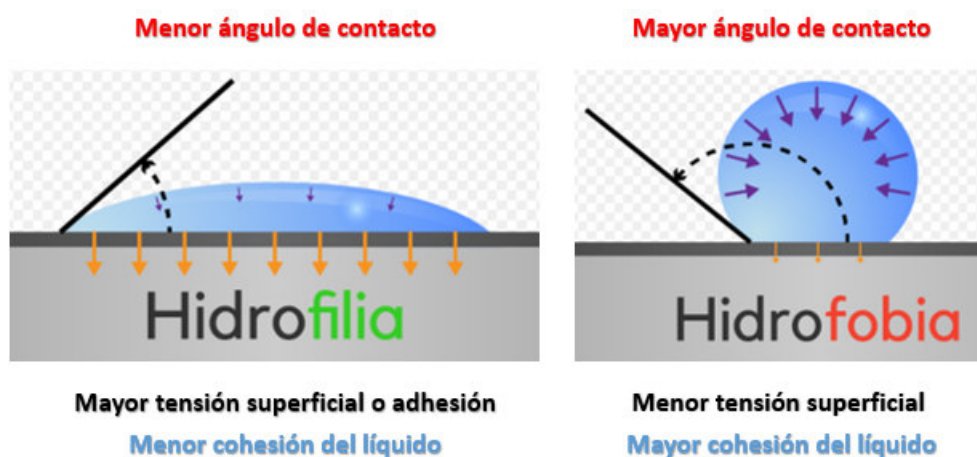


Figura 2.2: **Efectos del ángulo de contacto.** Adaptado de: Pallicer (2016)

De acuerdo a Pallicer (2016), la figura 2.2 representa los dos posibles casos que se puede presentar en la mojabilidad de una gota de un líquido cualquiera con una superficie, siendo la primera la adhesión entre la superficie del líquido y la superficie del sólido más fuerte que la cohesión interna del líquido, en definitiva el ángulo θ es menor a 90° presentando una **mojabilidad** entre el sólido y el fluido.



Figura 2.3: **Mojabilidad de un líquido.** Adaptado de: Pallicer (2016)

En el segundo caso la cohesión del líquido vence a la adhesión con la superficie del sólido y el líquido se mantiene separado del material, rehusándose a unirse. En la figura 2.3 se puede observar en el caso de algunos materiales como las hojas y el agua una adhesión muy baja.

El ángulo de contacto es una técnica que evalúa la limpieza de la superficie, permite detectar la presencia de contaminantes orgánicos como grasas y aceites, los cuales generalmente son de naturaleza hidrófoba (Kane y Mital, 1974).

El uso de aparatos específicos como el goniómetro o tensómetros así como el uso de ordenadores con software específicos, permite determinar el ángulo

de contacto de un adhesivo sobre un sustrato como se observa en la figura 2.4. La medición de los ángulos de contacto que permite determinar el grado de adhesión conlleva controversia hoy en día, puesto que es un sistema que depende de muchos factores y no es fácilmente reproducible en todas las situaciones. En función del líquido seleccionado y de la rugosidad de la superficie del sustrato, los valores resultantes de la medición del ángulo de contacto pueden variar enormemente, estas limitaciones y la falta de reproductibilidad de dicha medición, es lo que hace que este tipo de medición aporte información adicional sobre el grado de adhesión, pero no permite asegurar con certeza la correcta adhesión en una unión (Losadhesivos, 2019a).

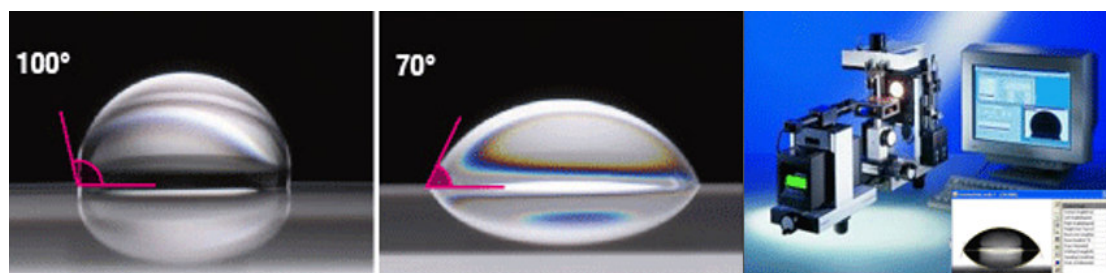


Figura 2.4: **Evaluación del ángulo de contacto.** Fuente: Losadhesivos (2019a)

Según esta interacción entre el líquido y la superficie, el ángulo de contacto se comporta como se muestra en la figura 2.5. Los límites para el valor del ángulo de contacto es 0° y 180° , revelan la mojabilidad completa y la no-mojabilidad respectivamente. Es decir un ángulo de contacto $\theta < 90^\circ$ indica que el líquido moja la superficie, mientras que $\theta > 90^\circ$ indica que el líquido no moja la superficie (Njobuenwu y colaboradores, 2007b).

Desde un punto energético, el ángulo de contacto de una gota de líquido sobre una superficie sólida está definida por el equilibrio mecánico de la gota bajo la acción de tres tensiones superficiales sólido – vapor (γ_{sv}), sólido – líquido (γ_{sl}), y líquido – vapor (γ_{lv}). La relación de equilibrio se conoce como la ecuación de Young (Kwok y Neuman, 1999).

$$\gamma_{lv} \cos \theta = \gamma_{sv} - \gamma_{sl}$$

Los fluidos más usados para la medición del ángulo de contacto son dióxido de carbono, etileno glicol, y yoduro de metileno, pero para evaluar la limpieza de la superficie se emplea agua desionizada (Kane y Mital, 1974). A nivel de la industria se considera que una superficie metálica tendrá una buena adhesión para tratamientos posteriores (como la deposición de películas poliméricas) cuando el ángulo de contacto medido en esa superficie con agua desionizada sea de 30° o menor (Zenkiewicz, 2007).

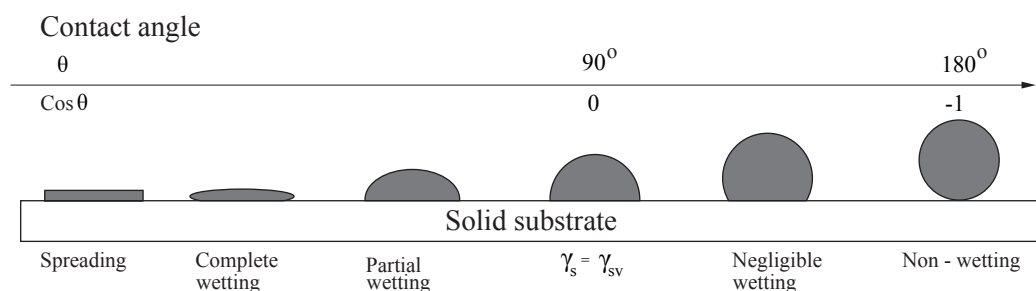


Figura 2.5: **Variaciones del ángulo de contacto.** Adaptado de: Njobuenwu y colaboradores (2007b)

2.3.2. Energía libre superficial

■ Interfase

Para un claro entendimiento de la energía libre superficial se debe tener presente que la interfase se conoce como la superficie de contacto entre un gas y una fase condensada (líquido o sólido), y se define una interfase como la superficie de contacto entre dos fases condensadas que pueden ser dos líquidos o un líquido con un sólido (Antón, 2005).

■ Tensión superficial

Se define la tensión superficial en un sólido como la fuerza de atracción hacia dentro ejercida sobre los átomos de la superficie, los centros atómicos cargados positivamente se mantienen unidos mediante la atracción mutua con los electrones, produciendo así un fuerte enlace metálico. Esta tensión tiene como consecuencia la contracción de la superficie (Askeland y Fulay, 2012).

Energía libre superficial

Shaw (1970), define como energía superficial a la energía necesaria para romper los enlaces intermoleculares dando lugar a la formación de una superficie considerando que en un líquido se define la energía libre superficial como trabajo, ésta energía es tangencial a la superficie y tiene unidades de fuerza por unidades de longitud (N/m). En un líquido las fuerzas de atracción que existen entre moléculas son de diferente magnitud dependiendo de la zona del líquido considerada. Las moléculas en el centro del líquido están lo suficientemente cerca para que el efecto de las fuerzas de atracción sea considerable, pero tienden a equilibrarse.

Por el contrario, las moléculas de la zona superficial como se puede observar en la figura 2.6, no están rodeadas completamente por otras moléculas del líquido y por lo tanto estas moléculas están desequilibradas con un efecto neto hacia el seno o centro del líquido, esta fuerza neta es normal a la superficie y será más baja mientras más pequeña sea dicha superficie, es decir, para una superficie mínima se cumple una energía mínima y por lo tanto podemos decir que la superficie de un líquido tiende a contraerse y el efecto resultante de estas fuerzas de contracción es lo que da origen a la tensión superficial, permitiendo además que la superficie sea estable.

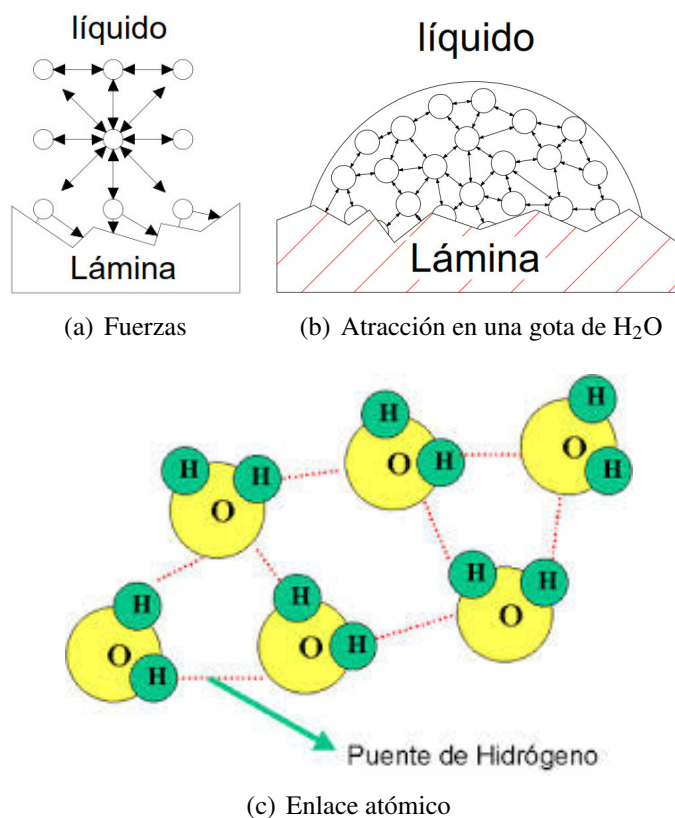


Figura 2.6: **Fuerzas atractivas que actúan sobre las moléculas en el seno de un líquido y en la superficie libre.** Adaptado de: Antón (2005)

Cálculo de la energía libre superficial

La energía libre superficial (γ_s) está formada por dos partes, el componente polar (γ_s^p) y el componente dispersivo (γ_s^d), relacionadas a través de la siguiente ecuación:

$$\gamma_s = \gamma_s^p + \gamma_s^d$$

El tratamiento con plasma modifica estos componentes, por lo tanto un tratamiento adecuado puede mejorar la mojabilidad de la superficie, pues existe una relación de de-

pendencia entre la energía libre superficial y la medición del ángulo de contacto con agua desionizada (Mortazavi y colaboradores, 2011).

Abbasian y colaboradores (2004) junto con Zenkiewicz (2007), indican que para medir la energía libre superficial de un sólido; se han propuesto varias teorías que relacionan el ángulo de contacto de una gota de líquido sobre un sólido con su energía libre superficial. Dentro de las teorías más usadas para analizar este fenómeno están las propuestas por Fowkes y por Wu. Según Fowkes, la energía libre superficial se obtiene al combinar las componentes superficiales polares y dispersivos utilizando una media geométrica. El resultado cuando se combina con la ecuación de Young se obtiene:

$$\gamma (1 + \cos\theta) = 2(\gamma_s^d + \gamma_l^d)^{1/2} + 2(\gamma_s^p + \gamma_l^p)^{1/2}$$

Donde los superíndices d y p corresponden a las componentes dispersivo y polar, y los subíndices L y S corresponden al líquido y sólido respectivamente.

Ma y colaboradores (1998) indica que la teoría de Wu es similar a la de Fowkes, pero en lugar de utilizar una media geométrica, utiliza una media armónica para sumar contribuciones de los componentes polares y dispersivos, su ecuación es la siguiente:

$$\gamma (1 + \cos\theta) = \frac{4\gamma_s^d \gamma_l^d}{\gamma_s^d + \gamma_l^d} + \frac{4\gamma_s^p \gamma_l^p}{\gamma_s^p + \gamma_l^p}$$

Superficies sólidas como el vidrio, cerámica y metales tienen elevada energía superficial, que corresponde a valores bajos de ángulo de contacto. Por contrario, los compuestos orgánicos tienen baja energía superficial y altos valores del ángulo de contacto.

2.3.3. Definición de plasma

El plasma es una tecnología con un potencial en diversas aplicaciones donde se introduce las principales bases científicas, así como las diferentes fuentes de descarga de plasma existentes en la actualidad (descripción y principios de operación) presentando una alternativa en el ámbito de la limpieza superficial y de los tratamientos superficiales. Según Plasmatreteat (2019), el plasma es un gas parcialmente ionizado compuesto de electrones, iones, fotones, átomos y moléculas en cualquier estado de excitación como se observa en la figura 2.7. Se conoce como el cuarto estado de la materia y constituye más del 99 % del universo. Según Losadhesivos (2019b), el uso de la tecnología plasma utilizado en la preparación superficial es de alta calidad y no es comparable con otros métodos mejorando la mojabilidad.

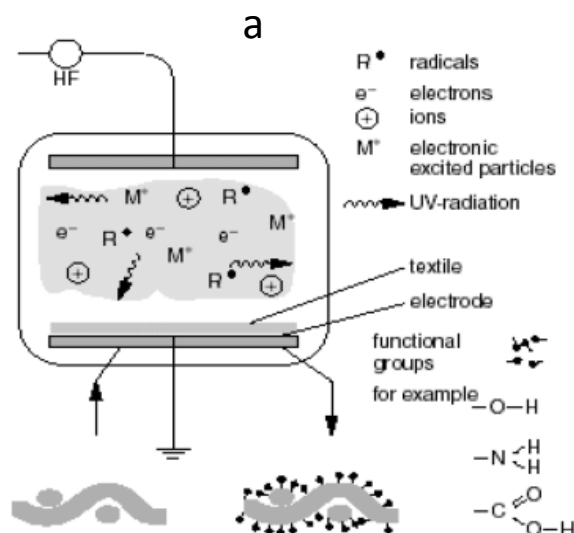


Figura 2.7: **Representación esquemática del plasma como cuarto estado de la materia.** Adaptado de: Bautista y colaboradores (2008)

La Tabla 2.2 presenta las principales ventajas de la tecnología plasma como sus posibles limitaciones.

Cuadro 2.2: **Ventajas y limitaciones de la tecnología plasma.**

Ventajas	Limitaciones
Modificación de propiedades superficiales sin cambio en las propiedades del interior del material.	Costes de inversión relativamente elevados.
Tecnología versátil (para prácticamente cualquier tipo de material).	Operación en discontinuo (o por capas) en equipos de plasma de vacío.
Consumo mínimo de productos químicos.	
Consumo de energía mínimo (eliminación de etapas de secado en procesos de polimerización).	
Procesos en seco (no produce aguas residuales).	Algunos equipos de plasma se encuentran todavía en fase de investigación y desarrollo.
Velocidades de operación elevadas (únicamente en procesos en continuo).	

Adaptado de: Bautista y colaboradores (2008)

El uso de plasma como proceso de preparación superficial permite realizar la operación de limpieza y activación superficial en un mismo proceso, además es capaz de limpiar las superficies de contaminantes orgánicos, tanto apolares como polares con una profundidad máxima de 5 micras, dado a que la alta reactividad de sus compuestos reaccionan o rompen los contaminantes produciendo sustancias volátiles que abandonan la superficie en forma de vapor (Bautista y colaboradores, 2008).

El plasma activa y aumenta la energía superficial del material debido a alta reactividad de los compuestos que forman el plasma, estos son capaces de romper los enlaces que se encuentran en la superficie para formar nuevos

enlaces con grupos funcionales, los cuales activan la superficie mejorando las propiedades de mojado y adhesión. Hoy en día el plasma no solo se utiliza para limpiar y activar las superficies, mediante el uso del plasma podemos obtener superficies resistentes a la corrosión, superficies hidrófugas, superficies antiadherentes (Losadhesivos, 2019b).

2.3.4. Producción y composición del plasma

Korsec y colaboradores (1994), indican que el principio para crear el plasma es el aplicar una cantidad de energía a un gas para reorganizar la estructura electrónica de los átomos de manera que se pueda producir iones. El plasma presenta propiedades de conductividad calorífica y eléctrica que dependen en gran parte de su grado de ionización. El estado de plasma comporta pérdidas energéticas por radiación al ambiente circundante por conducción en las superficies que están en contacto o por las diferentes reacciones químicas que tienen lugar. En consecuencia, para mantener el estado de plasma se requiere de un suministro de energía constante y tan rápido como las pérdidas de energía asociadas. El método más habitual para mantener el estado de plasma es mediante descarga eléctrica; el campo eléctrico transmite la energía a los electrones, que son las especies cargadas que poseen una mayor energía cinética. Esta energía electrónica se transmite a las especies neutras mediante colisiones elásticas o inelásticas como se observa en la figura 2.8.

2.3.5. Clasificación de los plasmas

Dependiendo del tipo de energía suministrada y de la cantidad de energía transferida, las propiedades del plasma cambia por lo que respecta a su densidad electrónica y a su temperatura.

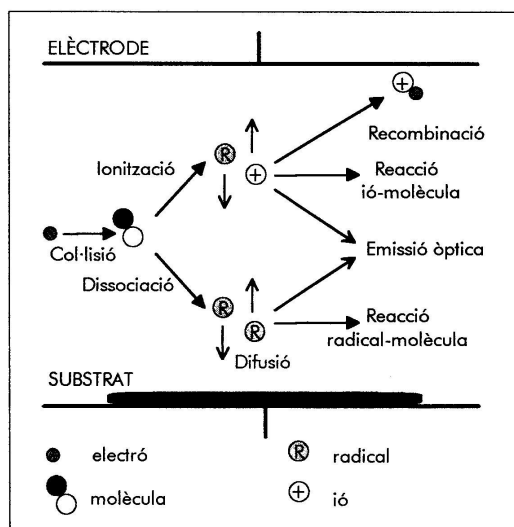


Figura 2.8: **Esquema de proceso de ionización y de transferencia de energía de átomos o moléculas mediante un campo eléctrico (E) y electrones acelerados.** Adaptado de: Bautista y colaboradores (2008)

- *En funcion del equilibrio térmico de los componentes presentes (la temperatura a la que se encuentran los elementos en la cámara de generación de plasma), se pueden clasificar en:*

- **Plasma frío (plasma no térmico de no equilibrio)**

López y colaboradores (2010), indican que los electrones poseen altas temperaturas ($T_e = 10,000 - 100,000$ K) mientras que el resto de componentes (átomos, neutrones, iones) presentan temperaturas bajas ($T_h = 300 - 1000$ K). La densidad electrónica es baja ($< 10^{19} \text{m}^{-3}$). Se utilizan en aplicaciones que requieren reactividad química a baja temperatura. Por ejemplo: reactores de descarga luminiscente para activar o recubrir superficies.

- **Plasma caliente (plasma térmico o de equilibrio)**

Según Castro y Vásquez (1997), todos los componentes que forman el plasma

presentan temperaturas altas ($T_e = T_h = 10,000K$) y se encuentran aproximadamente en equilibrio termodinámico. La densidad electrónica es elevada ($10^{21} - 10^{26} m^{-3}$). Se utilizan en aplicaciones que requieren alta temperatura. Por ejemplo: hornos de plasma, reactores de fusión nuclear.

- *En función de la frecuencia de descarga (o modo de excitación), las fuentes de plasma pueden ser de:*

- **Baja frecuencia (Low frequency, LF)**

Engloba todas las fuentes de descarga de frecuencia inferior a 1 MHz. Típicamente son fuentes de 40 kHz. Pueden operar con corriente directa (Direct Current, DC) de ondas continuas (antorcha de plasma) o pulsadas (descargas de corona). O bien con corriente alterna (Alternating Current, AC), cuyos equipos más representativos son los de descarga de barrera dieléctrica (Dielectric Barrier Discharge, DBD), tanto en configuración de descarga volumétrica como de descarga superficial (Diener, 2019a).

- **Radio frecuencia (Radio frequency, RF)**

Engloba las fuentes de descarga de frecuencia entre 1 MHz y 1 GHz. Típicamente se trata de fuentes de 13.56 MHz. Pueden operar con ondas continuas (plasmas de acoplamiento inductivo, Inductively Coupled Plasmas, ICP) o pulsadas. La adaptación de impedancias puede ser inductiva (descargas de alta potencia: sistemas ICP o IST) o capacitiva (descargas de baja potencia: equipos de plasma de vacío de electrodos planos, sistemas APPJ, de cátodos huecos, antorchas de plasma frío, micro plasmas) (Diener, 2019a).

- **Microondas (Microwave, MW)**

Engloba las fuentes de descarga de frecuencia superior a 1GHz. Típicamente este tipo de fuentes son de 2.3GHz. Las fuentes de plasma de microonda están formadas por: una fuente de potencia, un equipo de microondas, un sistema de ignición y un sistema de inyección de gas. Los plasmas inducidos por microondas se clasifican en tres categorías: plasmas de cavidades resonantes, antorchas de expansión libre (metálicas o semi-metálicas) y plasmas microstrip (Diener, 2019a).

- *Según la presión existente en la zona donde se genera el plasma, se puede clasificar en:*

- **Plasma de baja presión (o de vacío).**

Según Tendero y colaboradores (2006), se trata de plasmas fríos, descargas a baja presión de gas (0.1 - 10 Pa). Las fuentes de descarga utilizadas en sistemas de plasma de baja presión pueden ser de baja frecuencia, radio frecuencia o microondas. Operan en discontinuo (o por cargas) y comportan un coste de inversión alto. Sin embargo, son sistemas que se controlan fácilmente, permiten realizar procesos de polimerización por plasma y la incorporación de partículas.

- **Plasma atmosférico.**

Dow Corning Plasma Solutions (2006), nos indica que las descargas típicas a presión atmosférica son la descarga luminiscente (APGD) y la descarga de barrera dieléctrica (DBD). Operan en continuo y poseen velocidades de tratamiento elevadas. No obstante, el área de tratamiento es relativamente pequeña y el consumo de gases es elevado. Actualmente, gran parte de la

maquinaria de plasma atmosférico capaz de realizar procesos de deposición de líquidos (aerosoles) se encuentra aún en fase de desarrollo. Sin embargo, ya existen equipos basados en inyectores de spray múltiples que permiten recubrir superficies con capas poliméricas de 10 - 100 nm de grosor.

2.3.6. Aplicaciones generales de la tecnología plasma

Al existir diferentes equipos de plasma con diferentes características como estructura, suministro eléctrico, temperatura del plasma, condiciones de operación. Sus aplicaciones son muy variadas. A continuación se presentan las principales aplicaciones de la tecnología de plasma, principalmente en el ámbito de los tratamientos superficiales.

■ Análisis espectroscópico

Existen fuentes de plasma que se utilizan actualmente como fuentes de excitación para análisis espectroscópico. Las principales aplicaciones en este sentido se encuentran en la espectrometría de masas de plasma de acoplamiento inductivo (Inductively Coupled Plasmas Mass Spectrometry, ICP - MS) y en la espectroscopia de emisión óptica de descarga luminiscente (Glow Discharge Optical Emission Spectroscopy, GD - OES). Recientemente se han desarrollado sistemas analíticos miniaturizados basados en microplasmas.

■ Tratamientos de gases - Descontaminación y síntesis

Actualmente se comercializan equipos de plasma (principalmente antorchas de expansión libre) que utilizan procesos en seco a alta temperatura para eliminar contami-

nantes presentes en corrientes gaseosas (VOCs, CO, CFCs, HFCs, NO_x, SO₂, etc.) de la industria de automoción (gases de combustión de motores), química (disolventes, pinturas, barnices), petroquímica, etc.

■ **Tratamientos superficiales**

La tecnología de plasma permite tratar la superficie de materiales para conseguir los efectos de: limpieza superficial (desengrasado, eliminación de capas de óxido, descontaminación microbiológica), activación superficial (mejora las propiedades absorbentes y adhesivas) y funcionalización mediante recubrimientos (conductividad eléctrica, propiedades barrera química, resistencia a la corrosión, propiedades ópticas, resistencia a la abrasión, etc.). Las etapas de limpieza y activación a menudo preceden a procesos de deposición. Las propiedades fisicoquímicas superficiales son determinantes para obtener recubrimientos de calidad.

■ **Limpieza superficial**

Consiste en la eliminación de contaminantes (aceite, polvo, óxidos, agentes biológicos y químicos, etc.) presentes en la superficie de sustratos sólidos. El cuadro 2.3 muestra las principales aplicaciones de limpieza superficial por plasma como el sputtering y etching que pueden utilizarse para crear relieves superficiales a medida o cambiar la rugosidad de acuerdo a la necesidad; por ejemplo, en materiales dieléctricos a metalizar, micro o nanoestructuras superficiales para ingeniería celular o de tejidos, es utilizado para la remoción de corrosión en láminas metálicas. En estudios recientes se ha aplicado plasma frío a baja presión para la limpieza de superficies contaminadas con bacterias presentando excelentes resultados siendo una alternativa para la esterilización de materiales que no sean metálicos.

Cuadro 2.3: Limpieza superficial por plasma.

Fuente de plasma	Contaminante en superficie (sustrato)	Resultado obtenido	Sector de Aplicación
DBD	Aceite (Al, Si, Fe)	Lubricantes eliminados. La limpieza de plasma es más eficiente en aire que en O ₂ ., importancia de las especies metaestables de N ₂ . Alternativa viable a la limpieza en actona por ultrasonidos	Metalúrgico (hilos y láminas de acero, etc), semiconductores y componentes electrónicos (chips)
DBD de Ar/N ₂ o antorchas de expansión libre de He, Ne, Ar	Fe ₂ O ₃ (Fe)	Superficie limpia de 1-2 min	Automoción (residuos de adhesivos o de electrodeposición)
Plasma de LF de H ₂ /Ar	Al ₂ O ₃ (Al)	Reducción del óxido metálico	Limpieza de estructuras metálicas
Plasma de RF de Ar	Corrosión (metales)	Reducción de corrosión en 30 seg	Metalúrgico, en perfiles y láminas
Plasma de RF de He/O ₂	Contaminación química o biológica (vidrio)	Neutralización de gas mostaza o ántrax a baja temperatura y sin producción de residuos tóxicos	Médico, militar
Plasma de RF de aire	Microorganismos (Si, plásticos: PET, textiles: algodón)	Esterilización (cite A). No daño mecánico ni térmico a la estructura del material. Proceso en seco muy rápido (segundos). Efecto de erosión (sputtering, etching), oxidación y radiación UV	Semiconductores, envase y embalaje textiles médicos
Plasma de LF o de RF de aire o de He/O ₂	Grasas y ceras superficiales (textiles)	Eliminación de capas hidrófobas en fibras naturales (lana, algodón) y de aceites de ensimaje en fibras sintéticas (poliester, poliamida). Alternativa a procesos en húmedo de desengrasado y descrudado	Industria textil

Fuente: Tenders y colaboradores (2006)

■ Activación superficial

Reichel y Fellenberg (2001), indican que la activación superficial trata de modificar química y físicamente la superficie de materiales de tal manera que se pueda conferir propiedades específicas variando su energía libre superficial.

Según Sanchez y colaboradores (1986), la tipología y composición de los plasmas influyen en las propiedades superficiales de los materiales tratados (Cuadro 2.4). Este tipo de activación es útil para generar radicales libres con Ar) o funciones químicas reactivas (oxidantes: con aire, O_2 ; grupos amino: con N_2 , NH_3 ; con reductoras: Ar/ H_2) en superficie, preparándola para un proceso de acabado posterior (*grafting* superficial de compuestos químicos funcionales, inmovilización de biomoléculas, metalización, pintado, impresión, recubrimiento ,aplicación de adhesivo o cola, etc.). Si se utilizan gases fluorados (CF_4 , SF_6 , etc.) se obtienen tensiones superficiales muy bajas que comportan propiedades antiadherentes (oleofobia, por ejemplo) .La eficacia de los tratamiento de activación se caracteriza utilizando:

a) Medida de la tensión superficial

Mediante la determinación del ángulo de contacto o las tintas calibradas a diferentes tensiones superficiales para un análisis matemático.

b) Análisis superficial

Análisis espectroscópico (FTIR - ATR, XPS) para determinar la química superficial, topografía superficial (SEM, AFM).

En los tratamientos de activación por plasma se recomienda integrar el sistema de plasma en la línea de producción para evitar posibles pérdidas del efecto por enveje-

cimiento.

Cuadro 2.4: **Activación superficial por plasma.**

Fuente de plasma	Sustrato	Resultado obtenido	Sector de aplicación
Descarga de corona de aire	PP	Incremento de la tensión superficial de 43 mJ/m ²	
Tobera de plasma de aire	PP	Incremento de la tensión superficial de 56 mJ/m ²	Automoción, etiquetado, embalaje, alimentación
Plasma de vacío de aire u O ₂	Plásticos (incluyendo PTFE, PP, POM, PPS)	Incremento de mojabilidad (incremento de rugosidad y generación de grupos funcionales superficiales) y adhesividad (generación de radicales libres en superficie). Evita el uso de <i>primers</i>	Bienes de consumo, entre otros
Plasma de vacío de F ₂	Silicio	Procesos <i>etching</i> para estructurar superficies selectivamente	Semiconductores

Fuente: Sanchez y colaboradores (1986)

■ **Recubrimiento por plasma:**

Los recubrimientos sirven para conferir nuevas funcionalidades a las superficies de los materiales sin modificar las propiedades intrínsecas del lecho (interior del material). Se han desarrollado dos metodologías distintas para depositar recubrimientos por plasma:

a) Spray de plasma de aire (plasma jets):

Este tipo de recubrimiento se basa en partículas finas suspendidas en un gas portador, que se inyectan en el chorro (jet) de plasma a temperaturas cercanas a 15 K. Estas

partículas (metálicas, cerámicas, cermets) se aceleran y se funden, depositándose sobre los materiales deseados y solidificando por rápido enfriamiento. El desarrollo de este procedimiento está fuertemente ligado a la industria aeronáutica, la tabla 2.5 muestra ejemplos de sus principales aplicaciones (Martínez Alméciga, 2012).

Cuadro 2.5: Recubrimientos por chorros de plasma.

Recubrimiento	Funcionalidad	Aplicaciones
Zn, Al	Resistencia a la corrosión húmeda	Petroquímica (tuberías de agua o de gas), puentes entre estructuras metálicas
Zn, Al	Protección electromagnética para equipos electrónicos	Ordenadores
Al ₂ O ₃	Aislante eléctrico	Ozonizadores, hornos de inducción
CoCrAlY	Resistencia a la corrosión seca	Aeronáutica (turbinas de gas)
Zn, Sn, Cu	Conductividad eléctrica	Soldadura
Al ₂ O ₃	Biocompatibilidad	Biomédico: prótesis (rodilla, cadera), implantes (dientes)
ZrO ₂ - Y ₂ O ₃	Aislante térmico	Aeronáutica (boquilla de motores en cohetes)
Cr ₂ O ₃ , ZrO ₂ - Ni-CrAlY	Resistencia al desgaste	Mecánica, militar, aeronáutica, metalúrgica, industria papelera, petroquímica

Fuente: Martínez Alméciga (2012)

b) Deposición química de vapor inducida por plasma (PECVD):

Este tipo de procesos consisten en generar un estado de plasma (térmico o frío) de precursores en fase gas o vapor. El plasma se usa como medio químicamente reactivo

para activar estos precursores, que descomponen en fragmentos reactivos y se depositan en la superficie de los materiales presentes en el medio de reacción. Existen dos configuraciones distintas: directa y remota. En la directa se generan plasmas de precursores mezclados con gases, mientras que en la configuración remota únicamente se generan plasmas de los precursores. Los procesos ECVD permiten depositar todo tipo de materiales: óxidos, polímeros, recubrimientos basados en carbono, etc. Las velocidades de deposición van de unidades a decenas de mm por hora. La Tabla 2.6 muestra algunas de las principales aplicaciones (Neto y colaboradores, 2007).

Cuadro 2.6: Recubrimiento por plasma (PECVD).

Fuente de plasma	Recubrimiento	Resultado obtenido	Aplicaciones
Plasma de RF de He/vapores que contienen In, Sn	InO _x , SnO _x (polímero)	Films conductores eléctricos transparentes. Elevda adhesión. Proceso a temperatura ambiente	Films transparentes de óxidos conductores
Plasma de MW de HMDS/N ₂	SiO ₂ (fibra de C)	Recubrimientos de SiO ₂ densos y con buena adhesión	Materiales compuestos metal - matriz cerámica
Plasma de MW de HMDSO/Ar/O ₂	SiO ₂ (Si)	Recubrimientos de SiO ₂ . Generación de NO _x con lasma de aire	Propiedades barrera química, protección contra la corrosión
Plasma de LF de vinilacetato o ácido acrílico	COOR (textiles)	Nanorecubrimientos hidrófilos. Proceso en seco. Menor consumo de producto. Mejor tacto	Hidrofilia permanente

Fuente: Neto y colaboradores (2007)

c) Tratamiento del lecho (interior) de materiales:

Neto y colaboradores (2007), explican que existen aplicaciones de la tecnología de plasma en las que se trata el lecho (composición, propiedades, características, etc)

de diversos materiales. En todos los casos se utilizan fuentes de plasma atmosférico térmico (antorchas de plasma y fuentes de microondas), al no tratarse del objeto principal de este estudio, únicamente se mencionan las principales aplicaciones:

- Tratamiento de partículas finas: plata, cobre, nitruros, carburos, sinterización, etc.
- Tratamiento de residuos tóxicos: vitrificación, pirolisis de residuos médicos, descontaminación de residuos nucleares, etc.
- Material de maquinaria: soldadura, corte de cerámicos o metales, etc.
- Metalurgia: hornos de la industria cementera, purificación de metales, etc.

■ Lámparas de plasma:

Los plasmas de alta presión son medios muy reactivos que emiten radiación en el visible y, por tanto, pueden utilizarse como fuentes de luz (lámparas). Las principales lámparas basadas en plasma son:

- Lámparas de electrodo: mercurio a alta presión (color verde).
- Lámparas sin electrodo: lámpara de azufre (basada en microondas)

La tecnología de plasma posee una gran cantidad de aplicaciones tanto actuales como potenciales, que están condicionadas por las propiedades del estado de plasma (especialmente por la temperatura del gas) y por las fuentes de excitación que se utilicen. Por ejemplo, los tratamientos superficiales de polímeros requieren temperaturas bajas (inferiores a 500 °K), mientras que el corte o la soldadura de metales por plasma son procesos que necesitan temperaturas altas (superiores a 1500 °K).

Según Bautista y colaboradores (2008), la tecnología de plasma se encuentra en una etapa de madurez en sectores industriales como la automoción, el embalaje, el farmacéutico, el aeroespacial y el de semiconductores, entre otros. En otros sectores como

el textil (preparación, tintura y acabado), la alimentación (esterilización, recubrimientos del embalaje) o el metalúrgico (limpieza superficial) se trata de una tecnología emergente donde se han realizado gran cantidad de estudios de investigación con resultados satisfactorios.

2.3.7. Aspectos ambientales

Según Vargas (2005), el crecimiento económico y la globalización han originado evidentes beneficios, pero al mismo tiempo han provocado la aparición de nuevos riesgos. Existen dificultades e incertidumbres para identificar con exactitud la relación causal entre medio ambiente y salud. La medición de la exposición a numerosos factores ambientales es compleja porque no disponemos de sistemas adecuados de información y vigilancia sanitaria que permitan valorar la magnitud y gravedad de los riesgos (Rosales y colaboradores, 2001). La información disponible según Molina y colaboradores (2001) sobre las enfermedades relacionadas con el medio ambiente procede de la experimentación en animales, estudios de laboratorio, estudios epidemiológicos y toxicológicos. Los resultados de este trabajo de investigación permiten establecer la contaminación producida por procesos para limpieza de láminas metálicas que causan riesgos para la salud. Sabemos, además, que algunas sustancias ambientales por debajo de ciertos niveles no son peligrosas. Sin embargo, otros agentes, tales como alérgenos, radiaciones ionizantes, contaminantes del aire, preparados químicos carcinógenos, pueden suponer un riesgo a niveles más bajos de los observados (Ballester, 2005). A pesar de ello existen algunos trabajos que han identificado la relación entre determinados agentes ambientales y la salud humana.

Se ha estimado que en los países industrializados un 20 % de la incidencia total de enfermedades puede atribuirse a factores medioambientales (Smith y colaboradores, 1999). En Europa una gran proporción de muertes y años de vida ajustados por discapacidad es atribuible a exposiciones ambientales como contaminación del aire interno y externo, agua y saneamiento, sustancias y preparados químicos y lesiones producidas por accidentes.

La exposición a sustancias y preparados químicos peligrosos, el uso de biocidas y plaguicidas fitosanitarios, las sustancias CMR (carcinógenas, mutágenas y tóxicas para la reproducción), los COV (compuestos orgánicos volátiles) (Porta y colaboradores, 2002), las sustancias PBT (persistentes bioacumulables y tóxicas), las dioxinas (Kogevinas y G, 2000) y furanos, los PCB, los retardantes de llama, los alteradores endocrinos (Olea y colaboradores, 2002) representan amenazas que deben ser objeto de medidas de evaluación, reducción y control del riesgo tal como se establece en la legislación. Establecidos los riesgos con respecto a las emisiones al ambiente de sustancias químicas se debe considerar la calidad del agua que los procesos de limpieza generan, determinando la calidad de la misma por la medición de parámetros físicos, químicos, microbiológicos y sus valores máximos y mínimos permitidos de acuerdo al uso que se destine. Por tal motivo es necesario identificar y cuantificar los contaminantes producidos para definir que tan peligroso es para la salud y el ambiente en general. Las causas de la contaminación del agua son numerosas y varían desde los vertimientos líquidos de la agricultura hasta el uso de químicos caseros y todo lo que halla de por medio (Blanes y De la Quintana, 2010). Mientras que los estándares usados en nuestra sociedad para más de 75,000 compuestos químicos diferentes nos han ofrecido conveniencia y productividad adicional a nuestras vidas, también han llegado a costarnos tremendamente (Figuerola y colaboradores, 2003). Nuestro uso de químicos hechos por el hombre se ha tornado tan extremo que ahora se pueden encontrar trazas de toxinas de bajo nivel en todos los abastecimientos públicos de agua del mundo.

Según Ban (2008), los cambios tecnológicos del presente y futuro desarrollados por el hombre en cualquier ámbito se deben enfocar a conservar los recursos naturales de una manera sustentable sin afectar el delicado equilibrio natural, el tratamiento de las aguas usadas en la limpieza de láminas metálicas y activación por decapado son muy difíciles de disponer para el reusó que junto con lodos producidos que contienen metales pesados son muy tóxicos para el ser humano (Kogevinas y G, 2000; Olea y colaboradores, 2002; Porta y colaboradores, 2002).

2.3.8. Generador de Plasma frío a baja presión

Existen en la actualidad equipos que se pueden combinar como el plasma frío con el plasma a baja presión y esta tecnología ofrece varias aplicaciones para la modificación de superficies, con este fin los parámetros que se establezcan permiten limpiar el metal sin modificar su estructura. Estableciendo los parámetros idóneos en el equipo se pueden realizar diferentes modificaciones o efectos superficiales como se presenta a continuación.

2.3.8.1. Efectos en las superficies asociados a los tratamientos con plasma (gas ionizado)

La figura 2.9 muestra los principales efectos físico – químicos que se producen al tratar en una cámara con plasma una superficie sólida de un material en general (Plasmatreat, 2019). Para que se produzcan de manera controlada cada uno de los efectos en la superficie se debe controlar los parámetros de generación del plasma como el tiempo de aplicación del gas ionizado sobre la superficie para que realice el efecto programado. Es importante considerar el material donde se aplica la descarga puesto que dependerá del mismo para obtener diferentes resultados de modificación superficial además se debe considerar el tipo de gas a ser aplicado o la combinación de ellos para que presente el mejor resultado de acuerdo a los efectos que se requieran a nivel superficial.

Inclusión – grafting

Consiste en la incorporación de un componente externo en el material tratado por plasma. Por ejemplo: nitruración de acero mediante plasma de nitrógeno o cementación mediante carbono.

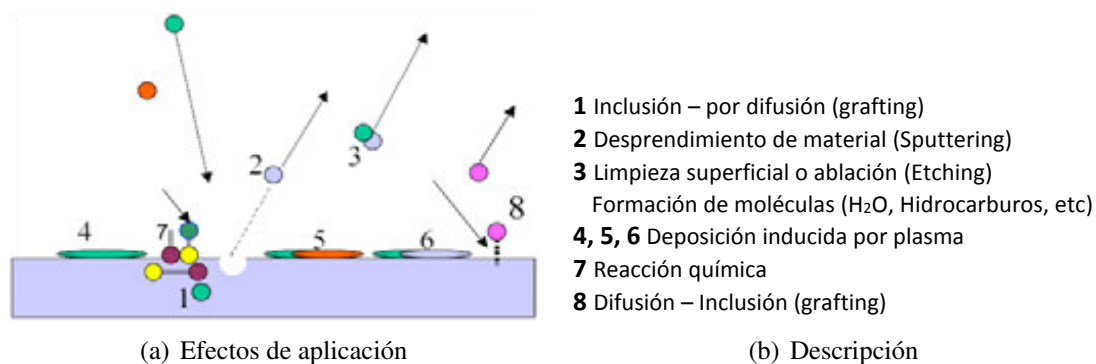


Figura 2.9: **Principales efectos del plasma en la superficie.** Adaptado de: SusChem (2008)

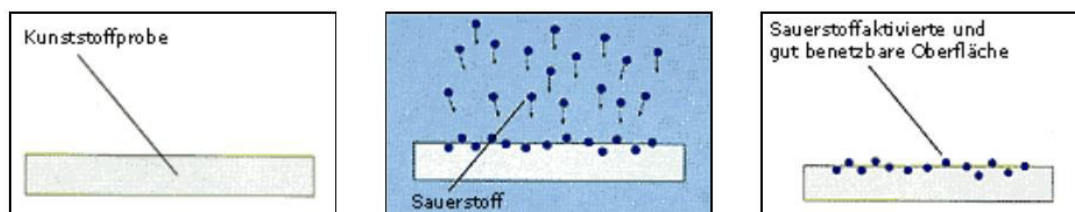


Figura 2.10: **Esquema de activación superficial.** Adaptado de: Diener (2015)

Desprendimiento de material – Sputtering

Si se produce la eliminación física (o ablación) de materia de las capas más superficiales. Por ejemplo: modificación de la rugosidad superficial de polímeros mediante plasma de argón. El sputtering se utiliza para pre- tratamiento antes de la impresión, encolado y pintura, así como para cambiar la rugosidad "del material. La superficie de los componentes está grabado con un gas de proceso reactivo, el material se elimina de forma selectiva, se convierte en la fase gaseosa y es aspirado (Diener, 2015).

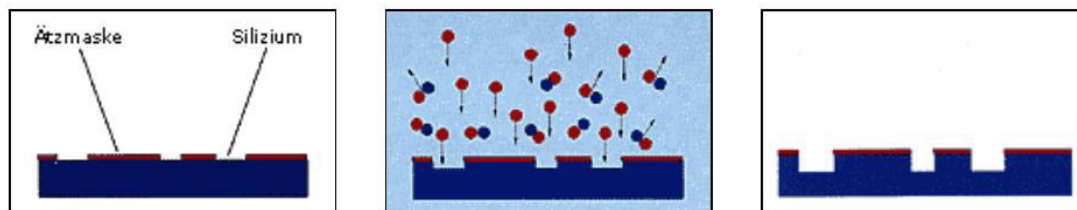


Figura 2.11: **Esquema de limpieza agresiva superficial.** Adaptado de: Diener (2015)

Limpieza superficial – Etching

Se genera etching cuando se produce la eliminación (o ablación) de materia de las capas más superficiales por reacción química entre componentes del plasma y componentes presentes en la superficie, por ejemplo: limpieza superficial de metales (aceites, grasas, ceras) donde la superficie de los componentes se purifica por el bombardeo de iones y físicamente, dependiendo del tipo de gas, y por reacciones químicas. La suciedad se aspira y se hace reaccionar en la fase gaseosa. La limpieza superficial se puede realizar solamente a superficies contaminadas con agentes orgánicos para que puedan existir reacciones químicas con el oxígeno y el hidrógeno y puedan formarse sustancias gaseosas que se desprendan de la superficie, las sales minerales, los residuos de corrosión no pueden ser removidos con una limpieza para ello se aplica el sputtering para lo cual los parámetros de generación de plasma son diferentes (Diener, 2015).

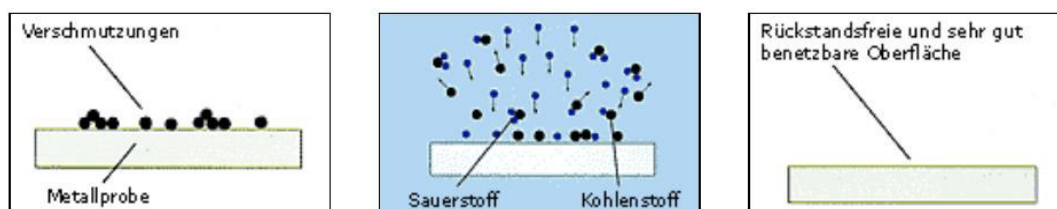


Figura 2.12: **Esquema de limpieza superficial.** Adaptado de: Diener (2015)

Deposición química de vapor inducido por plasma (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD)

Cuando en la superficie expuesta al plasma se deposita un recubrimiento formado a partir de la recombinación de fragmentos moleculares procedentes del estado de plasma. Se introducen en la cámara gases como hexametildisiloxano (HMDSN) , hexametildisilazano (HMDSN) , tetraetilenglicol dimetil éter , entre otros que se descomponen y se depositan en la superficie como una capa polimérica (Diener, 2015).

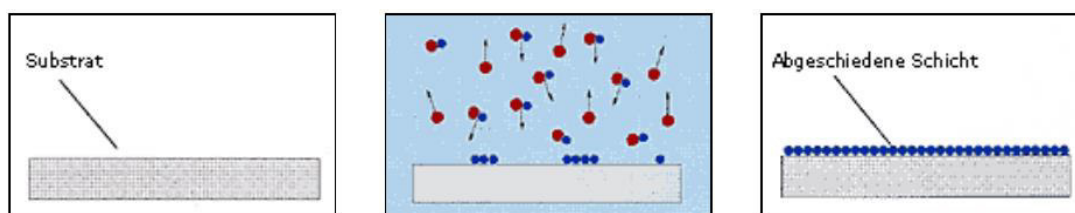


Figura 2.13: **Esquema de deposición superficial.** Adaptado de: Diener (2015)

CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA

3.1. Hipótesis general

El nivel de contaminación es significativo en la limpieza de láminas metálicas con plasma frío a baja presión a través del ángulo de contacto.

3.2. Hipótesis específicas

- 1) El nivel de contaminación por plasma frío a baja presión se analizará en la limpieza de láminas metálicas utilizadas en productos de línea blanca de acuerdo con el volumen de aceite contaminante.
- 2) El ángulo de contacto obtenido en la limpieza de láminas metálicas con plasma frío a baja presión y utilizadas para productos de línea blanca influye directamente en el nivel de contaminación.
- 3) El efecto del volumen de aceite y el ángulo de contacto inciden directamente en el nivel de contaminación generado por el plasma frío a baja presión en la limpieza de láminas metálicas para productos de línea blanca.

3.3. Identificación de variables

3.3.1. Variables de la hipótesis general

El nivel de contaminación generados es significativo en la limpieza de láminas metálicas con plasma frío a baja presión a través del ángulo de contacto.

Variable independiente

- Ángulo de contacto

Variable dependiente

- Nivel de contaminación

3.3.2. Variables de hipótesis específicas

a) El nivel de contaminación por plasma frío a baja presión se analizará en la limpieza de láminas metálicas utilizadas en productos de línea blanca de acuerdo al volumen de aceite contaminante..

Variable dependiente

- Nivel de contaminación

Variable independiente

- Volumen de aceite

b) El ángulo de contacto obtenido en la limpieza de láminas metálicas con plasma frío a baja presión y utilizadas en productos de línea blanca influye directamente en el nivel de contaminación.

Variable dependiente

- Nivel de contaminación

Variable independiente

- Ángulo de contacto

c) La interacción del volumen de aceite y el ángulo de contacto inciden directamente en el nivel de contaminación generado por el plasma frío a baja presión en la limpieza de láminas metálicas para productos de línea blanca.

Variable dependiente

- Nivel de contaminación

Variables independientes

- Volumen de aceite
- Ángulo de contacto

3.4. Operacionalización de variables

En la operacionalización de las variables se presentan su definición conceptual y operacional, indicador, magnitud, instrumento simulador e instrumento de medición. Los cuadros 3.1, 3.2 y 3.3 indican cada una de las variables analizadas. A continuación, se indica lo que representa cada variable dentro de un proceso de limpieza superficial en láminas metálicas.

Ángulo de contacto	⇒	<p>Dentro de un proceso de limpieza superficial el ángulo de contacto producido por un líquido de prueba especial que va a depender del tipo de superficie, representa el nivel o grado de limpieza de la superficie analizada.</p>
--------------------	---	---



Nivel de contaminación	⇒	<p>El nivel de contaminación representa el nivel de los gases producidos en el proceso de limpieza con plasma frío a baja presión, que dependerá de la legislación de la calidad ambiental en emisiones industriales donde se establecen los límites máximos permisibles.</p>
------------------------	---	---

Volumen de aceite	⇒	<p>El volumen de aceite representa la cantidad de contaminante sobre la superficie de la lámina de acero que es variable en la planta de producción y constante en las pruebas de laboratorio.</p>
-------------------	---	--

3.5. Matriz de consistencia


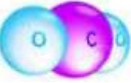
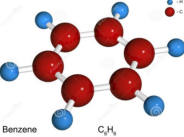
El cuadro 3.4 presenta la matriz de consistencia lógica con los problemas que justifican la presente investigación conjuntamente con los objetivos y las hipótesis supuestas.

Cuadro 3.1: Operacionalización de la variable: Volumen de aceite

VARIABLE INDEPENDIENTE: VOLUMEN DE ACEITE					
DEFINICIÓN CONCEPTUAL: El volumen de aceite representa directamente la cantidad de este que puede ser medido en litros o mililitros. DEFINICIÓN OPERACIONAL: El volumen de aceite representa la cantidad de contaminante sobre la superficie metálica representada en mililitros que está determinada por la diferencia de pesos y la conversión matemática correspondiente.					
DIMENSIONES	DEFINICIONES	INDICADOR	MAGNITUD	INSTRUMENTO SIMULADOR	INSTRUMENTO DE MEDICIÓN
Superficie sin aceite 	CONCEPTUAL Una superficie limpia está libre de aceite y cualquier tipo de contaminantes aunque estos no sean visibles al ojo humano. OPERACIONAL Una superficie limpia está relacionada directamente con a mojabilidad que depende de las fuerzas adhesivas de un líquido y el sólido que depende directamente del ángulo θ formado entre los dos.	Peso de la lámina sin aceite	Peso en gramos	Software especializado para el cálculo del volumen del líquido a partir de la diferencia de pesos	Balanza de precisión digital con una precisión de 0.0001 gr
Superficie con aceite 	CONCEPTUAL Una superficie contaminada presenta una cantidad de aceite y cualquier contaminante aunque estos no sean visibles al ojo humano. OPERACIONAL Una superficie contaminada esta relacionada directamente con a mojabilidad que depende de las fuerzas adhesivas de un líquido y el sólido que depende directamente del ángulo θ formado entre los dos.	Peso de la lámina con aceite	Peso en gramos	Análisis matemático Fórmula: $V = P \cdot \gamma$ donde: V = volumen P = peso γ = peso específico	Balanza de precisión digital con una precisión de 0.0001 gr

Fuente: Investigador

Cuadro 3.2: Operacionalización de la variable: Nivel de contaminación

VARIABLE DEPENDIENTE: NIVEL DE CONTAMINACIÓN					
DEFINICIÓN CONCEPTUAL: Se entiende por contaminación a la presencia en la atmósfera de sustancias en una cantidad que implique un riesgo para la salud de las personas y de los demás seres vivos. DEFINICIÓN OPERACIONAL: Los contaminantes gaseosos más comunes en la atmósfera son el monóxido y dióxido de carbono, los óxidos de nitrógeno, los óxidos de azufre, hidrocarburos y el ozono que pueden ser generados por reacciones químicas o por la combustión de combustibles fósiles.					
DIMENSIONES	DEFINICIONES	INDICADOR	MAGNITUD	INSTRUMENTO SIMULADOR	INSTRUMENTO DE MEDICIÓN
Monóxido de carbono CO 	CONCEPTUAL El monóxido de carbono, también denominado óxido de carbono es un gas incoloro y tóxico. OPERACIONAL La fórmula química es CO con un enlace covalente fuertemente polarizado hacia el oxígeno.	Gas generado	Las emisiones de CO se determinan en % del total del gas analizado	Software para la medición de las emisiones	Analizador de gases y su nivel de emisión
Dióxido de carbono CO₂ 	CONCEPTUAL Gas inodoro e incoloro que se desprende en diferentes procesos como la combustión. OPERACIONAL La fórmula química es CO ₂ con enlaces covalentes dobles, importante gas de efecto invernadero para el calentamiento global.	Gas generado	Las emisiones de CO ₂ se determinan en % del total del gas analizado	Software para la medición de las emisiones	Analizador de gases y su nivel de emisión
Hidrocarburos 	CONCEPTUAL Compuesto orgánico que surge al combinar átomos de hidrógeno con otros de carbono. OPERACIONAL La estructura molecular consiste en un armazón de átomos de carbono a los que se unen los de hidrógeno.	Gas generado	Los Hidrocarburos se determinan por partes por millón (ppm)	Software para la medición de las emisiones	Analizador de gases y su nivel de emisión

Fuente: Investigador

Cuadro 3.3: Operacionalización de la variable: Ángulo de contacto

VARIABLE INDEPENDIENTE: ÁNGULO DE CONTACTO					
DEFINICIÓN CONCEPTUAL: El ángulo de contacto se refiere al ángulo que forma la superficie de un líquido al entrar en contacto con un sólido. DEFINICIÓN OPERACIONAL: El ángulo de contacto depende principalmente de la relación que existe entre las fuerzas adhesivas entre el líquido y el sólido como de las fuerzas cohesivas del líquido. Representa el nivel de limpieza de una superficie identificandola como hidrofóbica o hidrofílica.					
DIMENSIONES	DEFINICIONES	INDICADOR	MAGNITUD	INSTRUMENTO SIMULADOR	INSTRUMENTO DE MEDICIÓN
Superficies: • Super hidrofílica $\theta < 10^\circ$ • Hidrofílica $10^\circ < \theta < 90^\circ$	CONCEPTUAL Cuando las fuerzas de adherencia son altas el ángulo es menor de 90° ya que el líquido se ve atraído por el sólido y se extiende. En el caso del agua se denomina superficies hidrófilas y super hidrófilas. Mientras más limpia o libre de contaminantes este la superficie más atraído se encuentra un líquido por la misma y la gota se extenderá completamente por el sólido. OPERACIONAL Para θ aproximadamente a 0° la gota se extenderá completamente en la superficie y para un ángulo hidrófilo o con una superficie óptima de limpieza θ puede variar entre 0° y 30° .	Ángulo de contacto	Grados sexagesimales	Software especializado en procesamiento de imágenes	Goniómetro óptico digital
• Super hidrofóbico $\theta > 120^\circ$ • Hidrofóbico $90^\circ < \theta < 120^\circ$	CONCEPTUAL Las fuerzas de adherencia entre el líquido y el sólido son muy bajas la superficie es hidrofóbica o superhidrofóbica, repele la adherencia de cualquier sustancia en la superficie. OPERACIONAL Para θ con valores superiores a 90° las superficies presentan un comportamiento hidrófobo y superiores a 120° superhidrófobo.	Ángulo de contacto	Grados sexagesimales	Software especializado en procesamiento de imágenes	Goniómetro óptico digital

Fuente: Investigador

Cuadro 3.4: Matriz de consistencia lógica.

Título: Proceso de plasma frío a baja presión y su influencia en el nivel de contaminación al realizar la limpieza de láminas metálicas
Autor: Luis Marcelo López López

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPÓTESIS	VARIABLES	TEORIA APLICADA	INDICADOR	TÉCNICA DE RECOLECCIÓN DE DATOS	ANÁLISIS DE DATOS
GENERAL	GENERAL	GENERAL					
¿Cuál es el nivel de contaminación en el proceso de limpieza de láminas metálicas con plasma frío a baja presión a través del ángulo de contacto ?	Determinar el nivel de contaminación generado en el proceso de limpieza de láminas metálicas con plasma frío a baja presión a través del ángulo de contacto	El nivel de contaminación es significativo en la limpieza de láminas metálicas con plasma frío a baja presión a través del ángulo de contacto	VI: Ángulo de contacto VD: Nivel de contaminación	<ul style="list-style-type: none"> ■ Limpieza superficial ■ Contaminación ambiental ■ Plasma 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Grados sexagesimales ■ % de gas generado 	Se obtienen de un generador de plasma con un goniómetro digital y un equipo analizador de gases	Se analiza el nivel de los gases generados aplicando plasma frío a baja presión y se compara cada grupo a diferente ángulo de contacto
ESPECÍFICOS	ESPECÍFICOS	ESPECÍFICAS					
¿Cuál es el nivel de contaminación por plasma frío a baja presión en la limpieza de láminas metálicas utilizadas en productos de línea blanca de acuerdo al volumen de aceite contaminante?	Analizar el nivel de contaminación por plasma frío a baja presión en la limpieza de láminas metálicas utilizadas en productos de línea blanca de acuerdo al volumen de aceite contaminante	El nivel de contaminación por plasma frío a baja presión se analizará en la limpieza de láminas metálicas utilizadas en productos de línea blanca de acuerdo al volumen de aceite contaminante	VI: Volumen de aceite VD: Nivel de contaminación	<ul style="list-style-type: none"> ■ Energía libre superficial ■ Tensión superficial 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Mililitros ■ % de gas generado 	Se obtienen de un generador de plasma con un goniómetro digital y un equipo analizador de gases	Se analiza el nivel de los gases generados y se compara la variación de los mismos con respecto a los diferentes ángulos de contacto
¿De que manera el ángulo de contacto obtenido en la limpieza de láminas metálicas con plasma frío a baja presión y utilizadas en productos de línea blanca influye en el nivel de contaminación ?	Establecer la influencia del ángulo de contacto obtenido en la limpieza de láminas metálicas con plasma frío a baja presión utilizadas para productos de línea blanca en el nivel de contaminación	El ángulo de contacto obtenido en la limpieza de láminas metálicas con plasma frío a baja presión y utilizadas en productos de línea blanca influye directamente en el nivel de contaminación	VI: Ángulo de contacto VD: Nivel de contaminación	<ul style="list-style-type: none"> ■ Líquidos de prueba ■ Ángulo de contacto 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Grados sexagesimales ■ % de gas generado 	Se obtienen en un goniómetro digital y el equipo detector de gases con el nivel de emisiones	Se realiza un análisis anova para determinar si los % de gases contaminantes muestran diferencias significativas a diferentes ángulos de contacto
¿De que manera el efecto del volumen de aceite y el ángulo de contacto inciden en el nivel de contaminación generado por el plasma frío a baja presión en la limpieza de láminas metálicas utilizadas para productos de línea blanca?	Analizar la incidencia del volumen de aceite y el ángulo de contacto en el nivel de contaminación generado por el plasma frío a baja presión en la limpieza de láminas metálicas utilizadas para productos de línea blanca	El efecto del volumen de aceite y el ángulo de contacto inciden directamente en el nivel de contaminación generado por el plasma frío a baja presión en la limpieza de láminas metálicas para productos de línea blanca	VI: Volumen de aceite Ángulo de contacto VD: Nivel de contaminación	<ul style="list-style-type: none"> ■ Contaminación ambiental ■ Ángulo de contacto 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Grados sexagesimales ■ % de gas generado 	Se obtienen en un goniómetro digital y el equipo detector de gases con el nivel de emisiones	Se realiza un análisis estadístico para determinar si influyen el volumen de aceite y el ángulo de contacto en el nivel de contaminación

Fuente: Investigador

3.6. Tipo y diseño de investigación

3.6.1. Tipo de investigación

Para determinar el nivel de contaminación atmosférica generada en la limpieza de láminas metálicas utilizadas en productos de línea blanca con un proceso de plasma frío a baja presión y de acuerdo a la literatura revisada en el desarrollo del tema, se planteo un tipo de investigación cuantitativa por utilizar una recolección de datos precisos para su análisis, que permitió desarrollar preguntas e hipótesis de la contaminación generada del proceso de limpieza que permitieron revelar las interrogantes planteadas e interpretar o explicar el comportamiento físico de la contaminación atmosférica de acuerdo a la manipulación de una variable de entrada en la limpieza de láminas metálicas a través del ángulo de contacto y determinar el comportamiento del nivel de contaminación de los diferentes gases producidos en el proceso. La investigación tuvo un alcance a su inicio exploratorio, porque la contaminación atmosférica generada por el proceso de limpieza de láminas metálicas con plasma frío a baja presión ha sido poco estudiada al ser una tecnología relativamente nueva, y muy poco del tema o casi nada se ha desarrollado en estos últimos años. De tal manera que fue importante obtener una primera información sobre los posibles gases que se puedan generar en el proceso y si pudieran ser detectados por equipos existentes de laboratorio que sean calibrados y reconocidos a nivel científico. Posteriormente se llegó a un alcance descriptivo donde se especificó los tipos de gases generados por el equipo al realizar la limpieza de los agentes contaminantes sobre la superficie de las láminas metálicas y sus niveles de emisión en las primeras pruebas realizadas, además de establecer procedimientos estandarizados bajo norma para la recolección de los datos. En el avance de la investigación se realizó un estudio correlacional donde se asoció las variables de limpieza superficial con el nivel de contaminación ambiental para establecer una posible vinculación entre ellas.

Para finalizar se aplicó un estudio explicativo para entender o responder las causas

de los eventos físicos referentes con la energía superficial para relacionar las variables analizadas en la limpieza de láminas metálicas y nivel de contaminación atmosférico, proporcionando un sentido de entendimiento al fenómeno que se presente. A continuación, se presenta un cuadro sinóptico del tipo de investigación y los alcances realizados:

INVESTIGACIÓN DE

ENFOQUE:

CUANTITATIVO

Análisis de datos: ángulo de contacto y nivel de gases generados



DE TIPO: APLICADA

Generación de conocimiento aplicado al sector productivo en beneficio de la sociedad



CON DISEÑO:

EXPERIMENTAL

Manipular las variables independientes para observar los efectos que producen en la variable dependiente

ALCANCES:

① EXPLORATORIO

Identificar los gases generados y entender los fenómenos físicos- químicos presentados

② DESCRIPTIVO

Especificación de gases generados y protocolos de medición

③ CORRELACIONAL

Asocia las variables:

- Ángulo de contacto
- Gases generados
- Volumen de aceite

④ EXPLICATIVO

Entender el fenómeno de tensión superficial en los resultados obtenidos

3.6.2. Diseño de investigación

Para la investigación se utilizó equipos de laboratorio calibrados que garanticen la veracidad de los datos obtenidos, se estableció un protocolo experimental en cada uno indicando su instructivo de uso con los parámetros de operación y las condiciones idóneas que permitan la repetitividad de los ensayos. Se realizaron pruebas exploratorias en la detección de gases y se estableció las condiciones iniciales de la experimentación. Realizadas las pruebas exploratorias se procedió con las experimentales como la toma de datos del gas generado, su nivel y el ángulo de contacto para posteriormente hallar la relación entre los mismos y explicar el fenómeno físico - químico que provoca esta relación. La figura 3.1 se indica el diseño de investigación utilizado.

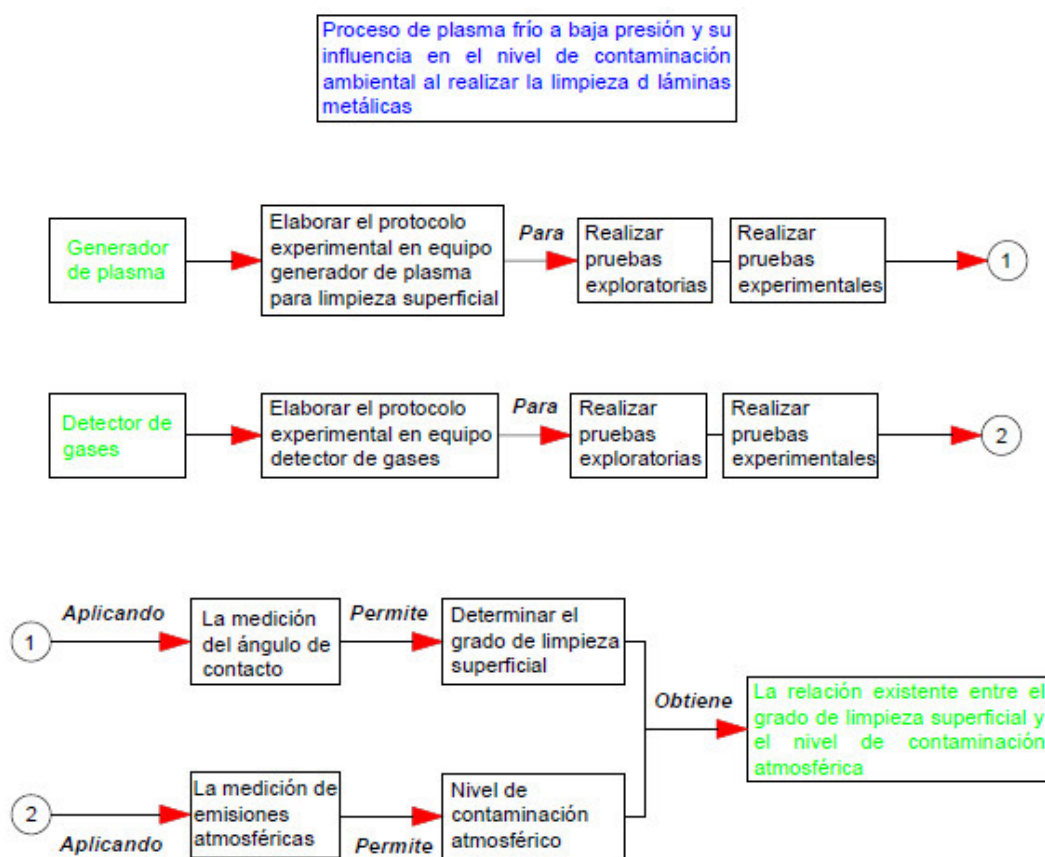


Figura 3.1: **Diseño de investigación** Fuente: Investigador

3.7. Unidad de análisis

Según Rada (2007), la unidad de análisis corresponde a la entidad mayor o representativa de lo que va a ser objeto específico de estudio en una medición y se refiere al qué o quién es objeto de interés en una investigación. En este contexto, la unidad de análisis de estudio y de mayor relevancia en la limpieza con la tecnología de plasma frío a baja presión son las “láminas metálicas utilizadas en productos de línea blanca” que han sido contaminadas durante el proceso de conformado mecánico y su limpieza produce una contaminación ambiental atmosférica la cual se pretende determinar su nivel y su relación con el grado de limpieza determinado por el ángulo de contacto. El cuadro 3.5 indica la unidad de análisis en referencia a las preguntas de la investigación.

Cuadro 3.5: **Unidad de análisis.**

Preguntas de investigación	Unidad de análisis
¿Cuáles son los gases generados por plasma frío a baja presión en la limpieza de láminas metálicas utilizadas en productos de línea blanca de acuerdo al volumen de aceite contaminante?	Láminas metálicas
¿De qué manera el ángulo de contacto obtenido en la limpieza de láminas metálicas con plasma frío a baja presión y utilizadas en productos de línea blanca influye en el nivel de los gases generados?	Láminas metálicas

Fuente: Investigador

3.8. Población de estudio

Para selección de la población de estudio se consideró criterios de homogeneidad, tiempo y espacio de manera que represente el total de las láminas metálicas de los diferentes aceros procesados en las líneas de producción para la fabricación de productos de línea blanca que posteriormente recibirán una protección posterior de pintura para evitar la corrosión y mejorar la presentación, en definitiva, 2 toneladas de acero son utilizadas para un recubrimiento posterior. Estos valores de consumo pueden variar de acuerdo a los niveles de ventas proyectados. El cuadro 3.6 presenta el consumo de acero.

Cuadro 3.6: **Población de estudio**

CONSUMO DE LAMINAS METÁLICAS	
En toneladas	
Acero NB0149	0.5 ton
Acero NB0248	1 ton
Acero NB0192	0.5 ton
TOTAL	2 ton

Fuente: Investigador

Para la determinación del tamaño de la muestra se consideró cierta discretización debido a las condiciones propias de la empresa y a las condiciones de laboratorio tales como:

- **Una hora definida para la toma de muestras durante el día.** La empresa estableció un horario de 30 minutos diarios para la recolección de muestras, donde fue necesario cortar en cizallas las láminas de acuerdo al tamaño establecido para la colocación en el generador de plasma por tal motivo solo se podía recolectar un número determinado de muestras por día.

- **La preparación del equipo.** Una vez extraídas las muestras no se pueden contaminar las mismas manteniéndoles en ambientes que podrían contaminar la superficie y alterar los resultados, por lo que los equipos se preparaban apenas extraídas las muestras.
- **El costo de los insumos.** Para la generación del plasma se utilizó oxígeno de alta pureza mezclado con argón para mejorar la ionización cuyos costos son elevados.

El cuadro 3.7 representa la población de estudio con el total del peso de láminas metálicas que son conformadas mecánicamente en una hora de producción de un total de 16 horas por día (se labora 6 días a la semana en 2 turnos de 8 horas), que aún no han sido contaminadas con aceite lubricante y que vienen directamente de la bodega de materia prima donde se contaminan con polvo y humedad antes de entrar a la línea de producción.

Cuadro 3.7: **Población de estudio**

	PRODUCCIÓN	
	En toneladas	En gramos
Mensual	2 ton	2×10^6 gr
Semanal	0.5 ton	0.5×10^6 gr
Diaria	0.08333 ton	0.08×10^6 gr
Turno	0.04166 ton	0.04×10^6 gr
Hora	0.00520 ton	5207 gr

Fuente: Investigador

Las dimensiones de la placa metálica (probeta) que ingresa a la cámara del plasma son de 5 cm x 5 cm con un espesor de 1 mm y un peso de 20.4 gramos como se observa en la figura 3.2. Si dividimos la producción de acero por hora para el peso de la placa, tendremos un total de población de 256 probetas o placas metálicas que se consideró la población del estudio para el análisis. El cuadro 3.8 presenta la producción o la cantidad en peso de láminas conformadas por gramos en una hora.



(a) Peso de la placa

(b) Descripción

Figura 3.2: **Peso de las placas de acero.** Fuente: InvestigadorCuadro 3.8: **Población de estudio: número de placas.**

PRODUCCIÓN	
En gramos	
Hora	5207 gr
Peso de la probeta	20.4 gr
Número de probetas (placas) por hora	256 placas

Fuente: Investigador

3.9. Tamaño de la muestra

3.9.1. Número de placas

Para determinar el tamaño de muestra de las placas metálicas y que sea representativa de la población de estudio con la mínima probabilidad de error y con un nivel alto de confianza, así como de probabilidad. Sampieri y colaboradores (2010), plantean establecer condiciones específicas de acuerdo a cada investigación, por tal motivo se considera:

- El error de equivocarse en la muestra o el número de láminas metálicas utilizadas en la experimentación no sea representativa al total de las láminas de la población de estudio sea de un 5 %.
- La certeza de probabilidad de éxito (p), de que la limpieza de las láminas metálicas influya en el nivel de contaminación sea de un 50 %, por no tener experimentaciones ni un marco teórico referencial previo. Con la primera consideración de éxito la probabilidad de fracaso (q), o que la limpieza de las láminas metálicas no influyan en el nivel de contaminación también es del 50 %, donde: $p + q = 1$.
- El nivel deseado de confianza es el complemento del error máximo aceptable del 5 %, entonces el nivel de confianza será del 95 % de acertar en la representatividad de la muestra.

En resumen:

Tamaño de la población	256 placas/hora
Error máximo aceptable	5 %
Probabilidad de ocurrencia	50 %
Nivel deseado de confianza	95 %

$$n = \frac{N \times Z_{\alpha}^2 \times p \times q}{e^2 \times (N - 1) + Z_{\alpha}^2 \times p \times q} \left. \vphantom{\frac{N \times Z_{\alpha}^2 \times p \times q}{e^2 \times (N - 1) + Z_{\alpha}^2 \times p \times q}} \right\} \text{ Ecuación del tamaño de la muestra}$$

donde:

N	=	Total de la población (número de muestras que salen por hora, 256 láminas de acero conformadas en una hora)
Z_{α}	=	1.96 si el nivel de confianza es del 95 % (por tabla)
p	=	probabilidad de éxito 0.5
q	=	probabilidad de fracaso 0.5
e	=	error de la muestra 0.05

Remplazando los valores en la fórmula:

$$n = \frac{256 \times 1,96^2 \times 0,5 \times 0,5}{0,05^2 \times (256 - 1) + 1,96^2 \times 0,5 \times 0,5}$$

$$n = 162 \text{ muestras}$$

Con este tamaño de muestra se identificarán los gases contaminantes y la relación entre el grado de limpieza y el nivel de contaminación generado.

3.10. Selección de la muestra

La selección de la muestra se lo realiza de manera aleatoria en la línea de producción una vez que están cortadas para el proceso de transformación mecánica conocido como embutición o estampado, sobre la superficie se encuentra aceite que se utiliza para facilitar el deslizamiento de las placas en las matrices o moldes de conformado. Las muestras son cortadas a las dimensiones requeridas para el ingreso en la cámara generadora de plasma.

3.11. Teoría de errores

Dentro de la investigación experimental realizada es necesario tener claro algunos conceptos de la teoría de errores que trata de identificar las diversas fuentes que pueden generar un error en una determinada medición física como el ángulo de contacto, el pesaje de las placas para determinar el volumen del líquido y la cantidad de líquido de prueba sobre para la medición del ángulo de contacto. También puede generar errores de medición por el transporte de las muestras donde pueden ser contaminadas, la manipulación de las

mismas y la experiencia del personal en el manejo de los equipos.

Estos valores, por muy cuidadosa que sea la observación y por muy grande que sea la precisión de los aparatos empleados, vienen siempre afectados por un conjunto de errores que no en todos los casos es posible determinar, y que son debidos a varias causas de muy diversa naturaleza: deficiencias de los aparatos de observación, variación de las condiciones ambientales, defectos de los sentidos o distracciones del observador, etc. Si se repite un cierto número de veces una observación en la que se trata de determinar el valor de una magnitud, efectuando todas las observaciones con los mismos métodos y aparatos y con el máximo esmero posible, se obtendrán en general resultados distintos en las distintas observaciones. (En realidad esta discordancia depende en cierto modo de la precisión que se quiera obtener pues, por ejemplo, si se realiza una serie de medidas de un mismo ángulo solamente con la aproximación del grado puede ocurrir que varias de ellas coincidan; esto difícilmente sucedería si se pretendiesen aproximaciones del orden del segundo o fracción de éste). Se presenta así el problema de definir, partiendo de estos datos de observación, cual ha de tomarse como valor de la magnitud medida, el que se llamará valor más probable, de modo que el error cometido al tomar dicho valor más probable como medida de la magnitud en cuestión sea el menor posible. Y adoptando ya este valor más probable interesa conocer el grado de precisión con que se han efectuado las observaciones, y la aproximación con que aquel representa la magnitud medida. (Sevilla, 1993)

Es necesario aclarar que en la investigación pudo existir errores, pero no equivocaciones en interpretaciones teóricas o despistes prácticos; también se buscó conseguir la máxima precisión en la toma de datos por lo que se utilizó protocolos de experimentación para que los ensayos sean repetitivos y tener una mayor exactitud tratando de evitar la mayor discrepancia o diferencia entre las medidas. A continuación, se presentan los posibles errores que pudieron haber afectado la toma de un dato ya sea en la medición del ángulo de contacto y

en la medición a través del analizador de gases para hallar el nivel de contaminación.

Según Sevilla (1993) pueden existir diversos errores, para la investigación se consideraron los siguientes:

Errores personales: estos se deben a los sentidos del laboratorista (sensibilidad, oído, vista, etc), a la capacitación que tenga en la manipulación de ciertos equipos y a la experiencia del mismo.

Errores instrumentales: esto se debe a los errores que pueden tener los equipos respecto a su calibración que produce un error en los ensayos.

Errores teóricos: el respaldo teórico es fundamental en ésta investigación para poder entender el fenómeno físico - químico que se produce y poder interpretar ciertos resultados que pueden parecer erróneos pero son correctos.

Errores accidentales: estos errores se deben a condiciones fortuitas que son difíciles de prever como un cambio en la temperatura, humedad y presencia de polvos.

Es importante en la investigación “el progreso de la ciencia, al estudiar las condiciones, métodos y aparatos de observación por un lado y la habilidad de los observadores por otro, automatizando cuanto sea posible la toma de datos, han de tender a descubrir todas las causas posibles de errores sistemáticos dando así lugar a su estudio y corrección o eliminación” (Sevilla, 1993).

3.12. Técnicas de recolección de datos para determinar el nivel de contaminación con relación al volumen de aceite

La recolección de datos para la investigación fue de observación directa en el laboratorio a través de los equipos de generación de plasma frío a baja presión y el goniómetro digital que esta enlazado al software CAM 100 que nos permitió determinar el ángulo de contacto.

De igual manera el generador de plasma está conectado a un equipo analizador de gases que me indica el porcentaje y tipo de gas desprendido en el proceso de limpieza con plasma frío a baja presión donde se eliminó las sustancias sobre las superficies de las láminas metálicas generando diferentes tipos de gases que por la rotura de los enlaces covalentes y de Vander Wals característicos de sustancias a base de carbono, silicio, oxígeno, hidrógeno, entre otros compuestos (Pozas y colaboradores, 2019). Es importante determinar los gases desprendidos en la limpieza, y para ello se presentó un plan para la obtención de datos que posteriormente son analizados.

Plan para determinar la influencia del volumen de aceite en el nivel de los gases generados

Ojetivo: Analizar los gases generados por plasma frío a baja presión en láminas metálicas utilizadas en productos de línea blanca de acuerdo al volumen de aceite contaminante

Pregunta: ¿Cuáles son los gases generados por plasma frío a baja presión en la limpieza de láminas metálicas utilizadas en productos de línea blanca de acuerdo al volumen de aceite contaminante?

Fuente:

Láminas metálicas utilizadas
para productos de línea blanca

Localización:

En la ciudad de Cuenca - Ecuador
en los laboratorios de la Universi-
dad Politécnica Salesiana (Indu-
glob)

⇒

Método de recolección de da- tos:

Observación directa en el anali-
zador de gases

Forma de preparación de da- tos:

Matriz de datos (Gases contami-
nantes y nivel de contaminación)

⇒

- 1.- La variable a medir: Porcentaje y partes por millón de los gases generados
- 2.- Las definiciones operacionales: Volumen de aceite y Gases generados (CO, CO₂, HC)
- 3.- Tamaño de la muestra: 162
- 4.- Recursos disponibles: Generador de plasma frío a baja presión y analizador de gases

En la toma de muestras de los gases generados por la descarga de plasma frío a baja presión sobre las láminas metálicas se consideró protocolos de experimentación para garantizar el éxito de la determinación de los gases, la repetibilidad del ensayo y la confiabilidad de los datos levantados, estableciendo protocolos para:

- ① Colocar los parámetros de control del generador de plasma frío a baja presión
- ② El manejo de las muestras (placas metálicas) en el generador de plasma
- ③ El manejo del equipo analizador de gases
- ④ El registro de los gases generados y sus niveles de contaminación

3.12.1. Equipos y materiales

3.12.1.1. Generador de plasma frío a baja presión

Para la investigación se utilizó un equipo generador de plasma frío a baja presión de Diener Electronic de la serie PICO Low Pressure System, como se observa en la figura

3.3, que contiene un gabinete eléctrico de 50 cm de ancho, 70 cm de altura y 50 cm de largo además posee una cámara de trabajo de diámetro 150 mm y longitud de 320 mm, el volumen de la cámara es de 5 litros aproximadamente con 3 canales de alimentación para gas accionadas por aguja. El generador eléctrico es de 13,56 MHz/0-100 W con una bomba de vacío Leybold, tipo Trivac E2 con 2,5 m³/h de caudal y 2×10^{-3} mbar de presión. El sistema de control es semi-automático, la duración del proceso es controlado por temporizador y posee un portador de piezas en la cámara de vacío. Las láminas metálicas utilizadas en la industria de línea blanca (fabricación de refrigeradoras, cocinas y lavadoras) que están contaminadas con aceite utilizado en la conformación mecánica son colocadas dentro de la cámara del generador de plasma que posteriormente es sellada para provocar un vacío previo al ingreso del gas que será ionizado con los parámetros idóneos para la generación, los mismos que han sido determinados en investigaciones anteriores por Sarmiento y sus colaboradores en el 2012.



Figura 3.3: **Generador de plasma.** Fuente: Investigador

El Cuadro 3.9 presenta los parámetros utilizados en el equipo de laboratorio para la generación del gas ionizado (plasma) y su descarga en la superficie de las láminas metálicas. Para la investigación se utilizó los parámetros medios en la combinación de gas ionizante,

presión, tiempo y potencia.

Cuadro 3.9: **Parámetros del equipo de plasma.**

Descripción	Unidad	Mínimo	Medio	Máximo
Presión	mbar	0.2	0.6 ✓	1
Tiempo	min	0.8	1.2 ✓	–
Potencia	%	10	50 ✓	90
Gas	O – Ar	10/90	50/50 ✓	90/10

Fuente: Investigador

La figura 3.4 indican los componentes del equipo los cuales nos permitieron tener una observación directa de los parámetros colocados.

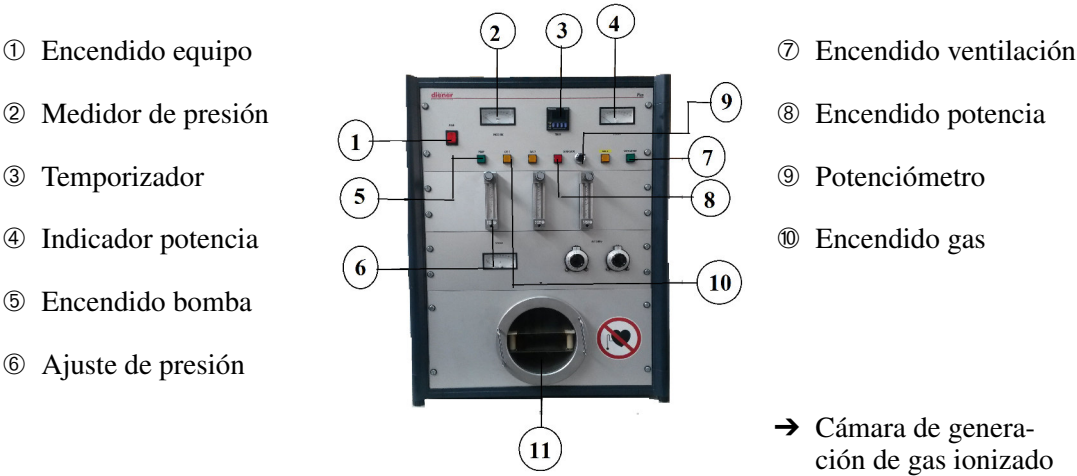


Figura 3.4: **Componentes del generador de plasma.** Fuente: Investigador

Diener (2019b) indica que el plasma elimina sustancias de la superficie. El oxígeno

los ataca químicamente y los convierte en compuestos volátiles. La presión negativa y el calentamiento de la superficie provocan la evaporación parcial de los aceites y sus restos. Las partículas energizadas del plasma rompen las moléculas del agente contaminante en fragmentos de moléculas de menor tamaño y, de esa forma, permiten extraerlas. Tanto en los productos recién fabricados, como en los que han sido almacenados, se encuentran generalmente capas invisibles de grasas, aceites, humedad y óxido. Para poder recubrir estas superficies sin defectos, es necesario que estén libres de sustancias que afectan la pintura; esto se logra con una limpieza con plasma que físicamente se puede observar en la cámara cuando forma un espectro de color característico de acuerdo al gas utilizado que se ioniza, a las reacciones químicas provocadas que se desprenden formando diferentes gases volátiles y en parte a las evaporaciones de pequeñas cantidades del aceite debido a los pequeños cambios de temperatura por las reacciones como se observa en la figura 3.5.

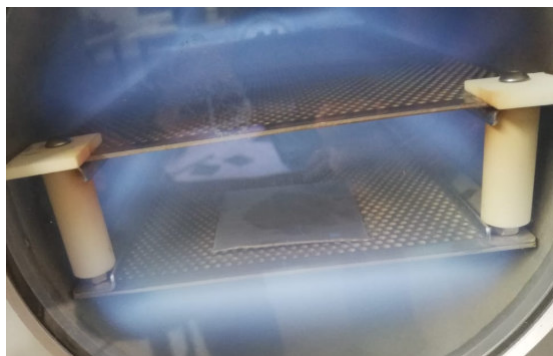


Figura 3.5: **Cámara de generación de gas ionizado.** Fuente: Investigador

3.12.1.2. Láminas metálicas

Las muestras fueron láminas metálicas como se observa en la figura 3.6, utilizadas en la fabricación de productos de línea blanca (refrigeradoras, cocinas y lavadoras) bajo procesos de conformado como embutición y estampado, por lo que se encuentran recubiertas de una capa de aceite colocado para disminuir la fricción y evitar rayaduras en la superficie.



Figura 3.6: **Placa metálica.** Fuente: Investigador

Las muestras tienen una longitud de 5 cm con 5 cm de ancho y un espesor de 1 mm para poder ser colocadas en la cámara del generador. Su composición química se puede observar en la tabla 3.10, donde el proveedor Severstal y la norma ASTM A424 indican que corresponde a una lámina de acero del tipo II y se describe en la tabla 3.10.

Cuadro 3.10: **Composición química de las muestras.**

Material	C %	Si %	Mn %	S %	P %	Cr %	Ni %	Cu %
NB0149	0,06	0,01	0,18	0,15	0,07	0,03	0,02	0,04
NB0248	0,06	0,01	0,18	0,20	0,06	0,02	0,02	0,04
NB0192	0,06	0,01	0,18	0,13	0,09	0,02	0,01	0,03

Fuente: Severstal

3.12.1.3. Aceite lubricante

El aceite mineral utilizado en el conformado mecánico es el LUBE HD—2 que es obtenido por la refinación el petróleo y se destaca por su viscosidad estable, capacidad de lubricación, fluidez y capacidad de disipar el calor entre otras, el cuadro 3.11 presenta las

principales características técnicas del mismo. El aceite tiene como componente mayoritario las bases minerales que son mezclas de hidrocarburos en forma de cadenas o de anillos saturados y no saturados que comúnmente pueden ser parafinas, naftenos y aromáticos. También se añaden pequeñas cantidades de aditivos como dispersantes, anticorrosivos, anti desgastantes entre otros agentes que mejoran las cualidades físicas que incrementan o reducen ciertas propiedades que pueden ser perjudiciales para determinada aplicación (Reliabilityweb.com, 2019). La empresa Induglob a seleccionado al aceite LUBE HD–2 como la mejor opción en lubricación para los procesos de conformados mecánico de sus láminas metálicas con un consumo de 55 galones mensuales. Para la investigación se utilizó el aceite adoptado por la empresa para la experimentación.

Cuadro 3.11: Características del lubricante LUBE HD–2.

Presentación	Líquido
Origen	Mineral
Fluidez	Alta
Índice de Viscosidad	Bajo 100
Punto de congelación	Débil $-10^{\circ}\text{C}/-15^{\circ}\text{C}$
Resistencia a la oxidación	Buena
Volatilidad	Buena
Biodegradabilidad	No
Consumo mensual utilizado en el proceso productivo	55 gl

Adaptado de: Reliabilityweb.com (2019)

3.12.1.4. Gases generadores del plasma

■ Oxígeno

El oxígeno es un elemento fundamental en la química orgánica, es incoloro, inodoro e

insípido y su número atómico es 8 con fórmula molecular O_2 (dioxígeno) en condiciones normales de presión y temperatura. El oxígeno es altamente reactivo formando fácilmente diferentes compuestos porque dos átomos de oxígeno se enlazan con una configuración electrónica de estado triplete o para implicar como un enlace doble, formando especialmente óxidos con la mayoría de los elementos, pero no reacciona con los gases nobles como el argón, helio y neón; es un fuerte agente oxidante. (Chang y College, 2002; Cruz y colaboradores, 2008). El oxígeno distribuye los electrones de la siguiente forma $1s^2 2s^2 2p^4$, un gas noble tiende a la estabilidad por lo que tiende a ganar 2 electrones en su último nivel para formar O_2 . En la investigación se utilizó oxígeno de alta pureza de manera que no exista reacciones no deseadas, es embazado en botellas de color verde con la etiqueta correspondiente provisto por la empresa AGA representante de la marca Linde a nivel internacional. La hoja técnica de las características y propiedades del oxígeno de alta pureza utilizado en la experimentación se presentan en el Anexo A.

(a) Botella de oxígeno



(b) Válvula de la botella



(c) Regulador de presión de oxígeno



Figura 3.7: **Botella o cilindro de oxígeno.** Fuente: Investigador

■ Argón

El argón es un gas inerte y noble (no tóxico) cuyo símbolo químico es Ar y su número atómico 15. Es incoloro e inodoro en estado gaseoso como líquido, tiene 18 electrones/protones con 22 neutrones. Los 18 electrones se distribuyen, $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6$. Por ello los átomos de los gases nobles no son afines a ganar electrones siendo elementos que tienen los valores más altos de electronegatividad (Chang y College, 2002; Cruz y colaboradores, 2008). El argón fue provisto por la empresa AGA representante de Linde en Ecuador. El argón de es embazado en botellas de color negro con la etiqueta correspondiente (ver Anexo B).

(d) Botella de argon



(e) Centralilla de gases



(f) Regulador de presión de argon



Figura 3.8: **Botella o cilindro de argon.** Fuente: Investigador

3.12.1.5. Equipo analizador de gases

Los gases producidos en la limpieza de láminas metálica fueron detectados por un analizador QROTEC modelo QGA 6000 como se observa en la figura 3.9 y en el Anexo C. El Analizador detecta gases en ppm (partes por millón) y en porcentajes (%) de acuerdo al tipo gas como el monóxido de carbono CO, que es un gas altamente tóxico y puede ocasionar la muerte en niveles elevados, el dióxido de carbono CO₂, que es un importante gas de efecto invernadero que afecta al calentamiento global, el oxígeno diatómico O₂, que es necesario para sostener la vida, los hidrocarburos HC, que son compuestos de carbono e hidrógeno que comúnmente son implicados en las intoxicaciones y los NOX, que es un término que representa a un grupo de gases muy reactivos tales como el óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂) .



Figura 3.9: **Equipo analizador de gases QROTECH Modelo QGA 6000.** Adaptado de: Wonmi y colaboradores (2019)

EQUIPO QGA 6000

- | | |
|--------------------------|---|
| 1. Caja de impresión | 7. Tecla MENU |
| 2. Ventana display de CO | 8. Tecla PRINT |
| 3. Ventana display de HC | 9. Tecla 0 |
| 4. Tecla ESC | 10. Ventana display de O ₂ |
| 5. Tecla ENTER | 11. Ventana display AFR/NO _x |
| 6. Tecla PURGE | 12. Ventana display del estado |
| | 13. Ventana display CO ₂ |

Wonmi y colaboradores (2019), indican que:

El analizador está configurado para realizar una medición aplicando el método Non Dispersive Infra-red (NDIR) para analizar CO, HC, y CO₂, y método electroquímico para analizar O₂ y NO_x. En el método de análisis NDIR, se sitúa una fuente de rayos infrarrojos en un extremo del banco de muestra y en el otro se adjunta un sensor para que detecte el componente de un gas y pueda calcular su densidad. Como se observa en la figura 3.11 en la cámara a través del infrarrojo se detecta el gas presente y dependiendo de la densidad del mismo su porcentaje de presencia o en partes por millón dependiendo de cada sistema detector. La mayoría de los equipos tienen una combinación de sistemas para detectar la mayoría de los gases presentes y presentar los resultados de acuerdo a la combinación de estos sistemas.

El método electroquímico mide la densidad del gas usando la cantidad de electrón producido en el momento de oxidación y reduciendo la reacción del gas (ver figura 3.11).

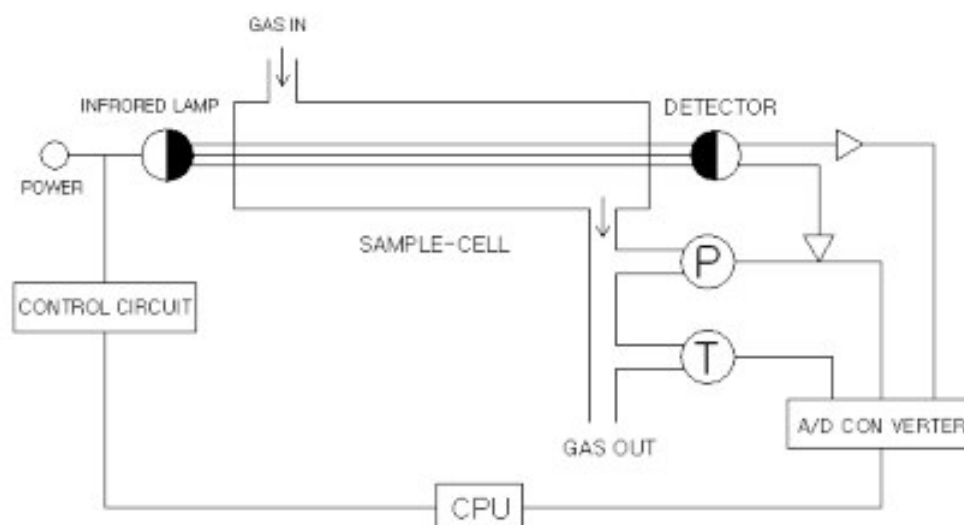


Figura 3.10: **Diagrama del método NDIR.** Fuente: Wonmi y colaboradores (2019)

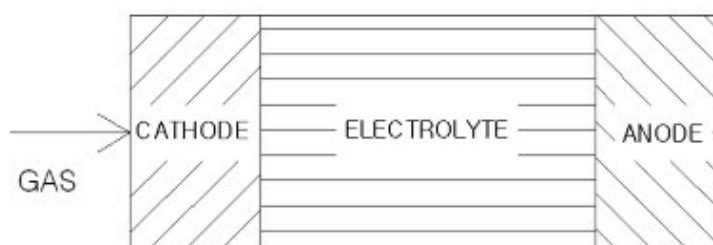


Figura 3.11: **Diagrama del método electroquímico.** Fuente: Wonmi y colaboradores (2019)

Para la experimentación se colocó la salida del conducto PROBE en la salida de la cámara del generador, teniendo en cuenta el sentido del flujo para colocar los filtros y realizando una buena conexión para que no se originen mediciones falsas en el analizador (Ver figura 3.12)

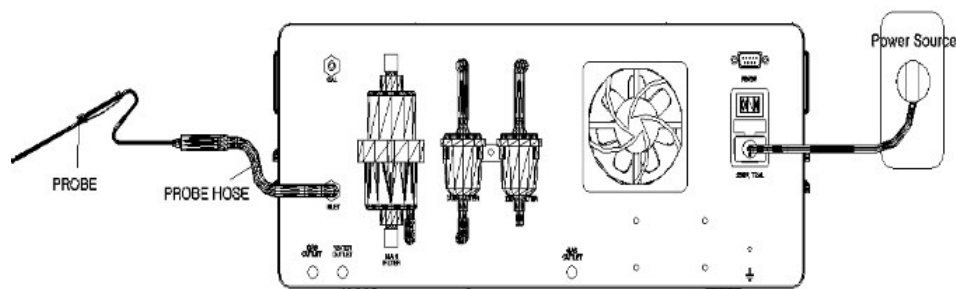


Figura 3.12: **Conexión del analizador.** Fuente: Wonmi y colaboradores (2019)

3.12.2. Protocolos de experimentación en la determinación de los gases generados

Para una correcta recolección de datos de los gases desprendidos en el proceso de limpieza que garanticen la confiabilidad y la repetitividad se plantearon los siguientes protocolos de experimentación en cada etapa y para cada uno de los ensayos realizados de acuerdo al procedimiento general presentado en la figura 3.13.

ETAPA 1: Para la colocación de la muestra en la cámara se consideró:

1. Las láminas metálicas se seleccionaron aleatoriamente de la línea de producción al final del proceso de transformación de embutido o estampado, se realiza el pesaje en una balanza de precisión antes de la aplicación de plasma, posteriormente es limpiado en su totalidad con un disolvente para el pesaje de la placa sin sustancia y determinar el volumen del aceite inicial.
2. Se recortaron de acuerdo a las dimensiones requeridas para la colocación en la cámara del generador.
3. Sean transportadas sin tocar la superficie contaminada, y almacenadas en un lugar

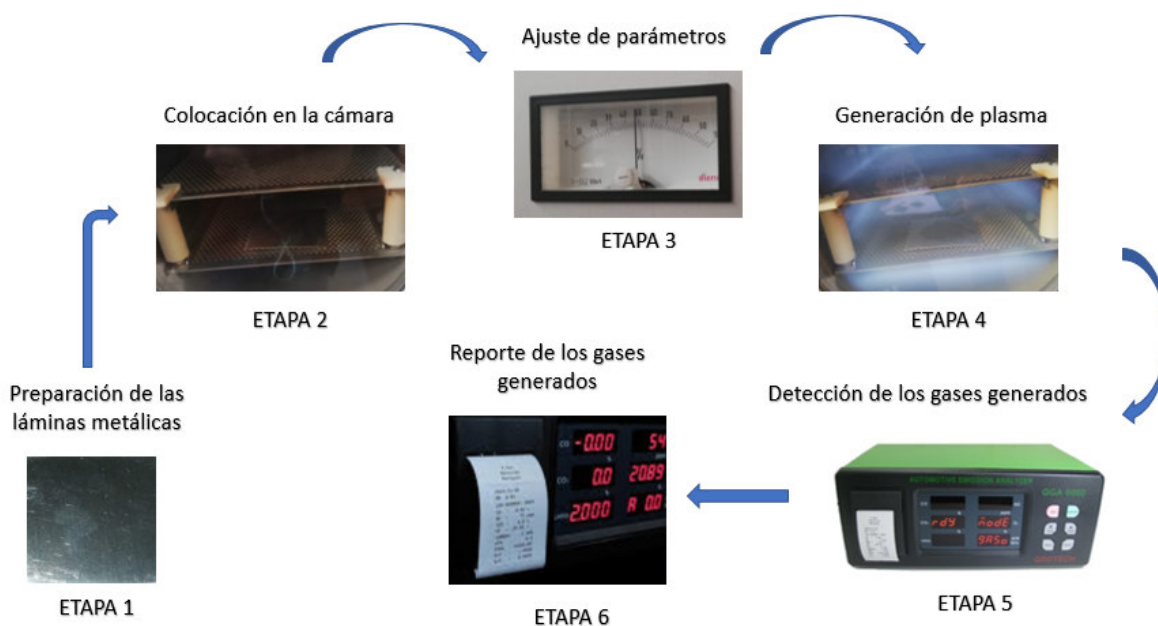


Figura 3.13: **Procedimiento para detectar los gases generados.** Fuente: Investigador

aislado del polvo y la humedad.

4. Los ensayos deben ser realizados máximo hasta tres horas posteriores a la recolección en planta.
5. La manipulación de las láminas por parte del laboratorista debe ser el adecuado utilizando equipo de protección limpio como mandil y guantes de látex para evitar la contaminación con sales y minerales. La manipulación debe ser por los extremos de las mismas.

ETAPA 2: Para la preparación de las láminas metálicas se consideró:

1. La limpieza de la cámara antes y después de cada jornada.
2. Revisión de los sellos o empaques de la cubierta.
3. Limpieza de la tapa para garantizar el sellado.

4. Las muestras deben colocarse con la superficie contaminada hacia arriba y paralelamente a la cámara.

ETAPA 3: En el ajuste de los parámetros se estableció:

1. Una presión de 0.6 mbar
2. Un tiempo de 1.2 min
3. Una potencia al 50 %
4. Una mezcla de argón y oxígeno al 50 %

ETAPA 4: Para la generación del plasma se consideró que las etapas anteriores esten totalmente cumplidas para poder dar la orden de generación a través del comando.

ETAPA 5: En la detección de gases generados se consideró:

1. La apertura de la válvula para la salida de los gases hacia los sensores, una vez terminada la aplicación del plasma sobre la superficie contaminada.
2. El cierre de la válvula para evitar el retorno del gas.
3. El posterior cerrado de la válvula antes de generar el vacío para el siguiente ensayo.
4. El seteo para la puesta en cero del equipo para el siguiente ensayo.

ETAPA 6: Para el reporte de los gases generados se consideró que:

1. Se realiza el seteo del equipo en cada ensayo para posteriormente los resultados que son visualizados sean registrados en una base de datos.

3.12.3. Análisis e interpretación de los datos

Para manejar la información de los datos obtenidos y poder analizarlos se planteó un procedimiento para cumplir con los objetivos planteados y demostrar las hipótesis propuestas, a continuación, se presenta el análisis para los gases generados en el proceso de limpieza de láminas frías con plasma frío a baja presión y su nivel de contaminación de acuerdo al grado de limpieza que depende del ángulo de contacto o la energía libre superficial.

Realizadas las pruebas exploratorias donde se calibra el equipo generador de plasma frío y se aplica un flujo de gas ionizado conocido como plasma frío a baja presión sobre la superficie de láminas metálicas (probetas) contaminadas con aceite durante el proceso de conformado mecánico, donde simultáneamente se conectó un equipo especial para detectar los gases generados al descomponer el aceite de la superficie, se procede a la toma de datos para su interpretación considerando el procedimiento a seguir en cada experimentación.

Establecidos los procedimientos idóneos procedemos a la experimentación y toma de datos de las 162 muestras calculadas para las pruebas experimentales. Como las láminas fueron tomadas de la planta de producción, codificadas y llevadas al laboratorio se espera que se determinen los diferentes gases contaminantes producidos por la descarga y su nivel en ppm. Como cada lámina metálica no tiene una cantidad definida de contaminante en la superficie se supone que los niveles de los gases deben ser diferentes y se debe demostrar su dispersión en los valores, para ello se calcula la desviación estándar que nos indica que mientras menor sea el valor de la misma, los datos serán más homogéneos, es decir existe menos dispersión, el incremento de los valores de la desviación estándar indica una mayor variabilidad de los datos.

La figura 3.14 presenta las variables que intervienen en el proceso de limpieza por plasma frío a presión, donde se determina los tipos de gases contaminantes y su nivel

de emisiones generados por el plasma. Se debe considerar que el ángulo de contacto que representa el grado de limpieza permanece constante para los diferentes ensayos en todas las muestras, debido al efecto de la cantidad de gas ionizado, a la potencia de acción del generador y al tiempo de ataque del gas sobre el aceite colocado sobre la superficie.

Para el análisis de los datos del porcentaje y las partes por millón (ppm) de los gases generados por el proceso de limpieza por plasma en las 162 muestras se procedió a determinar si existe una dispersión considerable entre ellos y si existe una relación entre las variables con las condiciones analizadas.

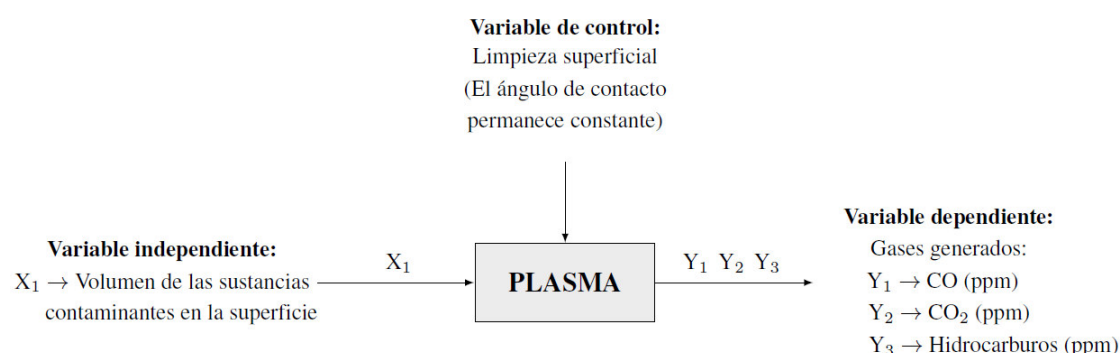


Figura 3.14: **Variables que intervienen en el análisis de datos.** Fuente: Investigador

Para el cálculo de la desviación estándar utilizamos la fórmula para la muestra de una población que nos indica que tan alejados están los datos de la media.

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Donde:

- s** es la desviación estandar
- x** el valor de ppm o porcentaje de cada uno de los gases
- \bar{x} la media aritmética
- n** corresponde al tamaño de la muestra

Se consideró que el ángulo de contacto permanece constante en la determinación del tipo de gas y su nivel de contaminación.

3.12.4. Prueba de hipótesis

Para la verificación de los supuestos de las hipótesis planteadas en la investigación y sistematizar las relaciones que se pretende encontrar entre el volumen de aceite y los gases generados se plantearon las hipótesis estadísticas para ser evaluadas por medio de técnicas que confirmen o no los supuestos planteados.

Para comprobar o contrastar las hipótesis estadísticas se planteó utilizar el coeficiente de correlación de Pearson que permite establecer la relación entre las dos variables cuantitativas es decir que cuando una de ellas varía en su valor esto origina un cambio en el valor de la covarianza (valor que indica el grado de variación conjunta de dos variables aleatorias respecto a sus medias). El coeficiente de correlación se obtiene dividiendo la covarianza por el producto de las desviaciones estándar de ambas variables, la fórmula práctica de cálculo se presenta en la siguiente ecuación considerando que el cálculo del coeficiente de correlación debe realizarse con muestras grandes (Gamarra y colaboradores, 2015).

$$r_{xy} = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[n\sum x^2 - (\sum x)^2][n\sum y^2 - (\sum y)^2]}}$$

Donde:

- r_{xy} el coeficiente de relación de Pearson
- x son valores de la variable independiente
- \bar{y} son los valores de la variable dependiente
- n es el tamaño de la muestra

Es necesario comprender que “la característica fundamental de este índice es que mide la existencia de una relación lineal entre dos variables. El valor del índice de correlación varía en el intervalo $[-1; +1]$ ” (Gamarra y colaboradores, 2015).

Se establece que para un coeficiente igual a 0 se indica una independencia total de las variables, es decir, el valor que asuma la una variable no influye en lo absoluto en el valor de la segunda variable. Un coeficiente de correlación igual a -1 indica una dependencia total en relación inversa, es decir, cuando una de ellas aumenta la otra disminuye. Un coeficiente igual a +1 indica una dependencia total, es decir, cuando la una de ellas aumenta la otra también aumenta. En la figura 3.15 se observa la dirección de la correlación, si es (+) correlación directa “a mayor X, mayor Y” o “a menor X, menor Y” ; si es (-) correlación indirecta “a mayor X, menor Y” o “a menor X, mayor Y” (Gamarra y colaboradores, 2015).

Una vez calculado el coeficiente de correlación interesa determinar si el valor obtenido indican que las variables en realidad se relacionan o es consecuencia del azar, o en otras palabras si el coeficiente representa con el nivel de significación analizado la correlación. A este respecto, como siempre se plantea dos hipótesis posibles (Gamarra y colaboradores, 2015).

- H_0 : Las unidades de una variable no se correlacionan con las unidades de la otra.
- H_1 : Las unidades de una variable se correlacionan con las unidades de la otra variable.

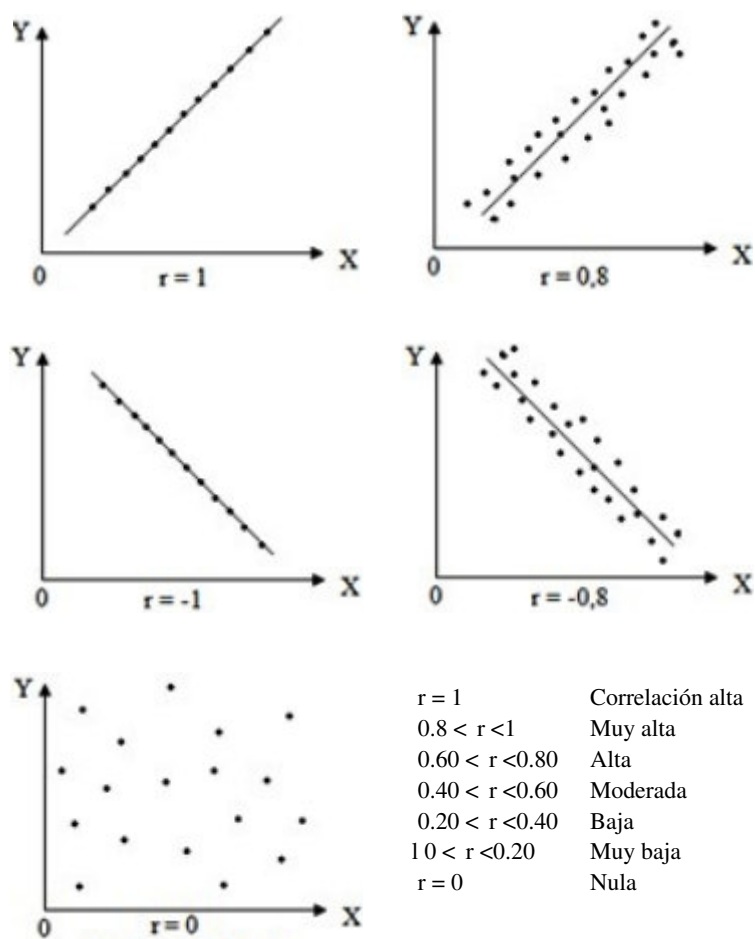


Figura 3.15: **Correlación de Pearson.** Adaptado de: Gamarra y colaboradores (2015)

Desde el punto de vista estadístico podríamos plantearlo de la siguiente forma:

H_0 : El coeficiente de correlación obtenido procede de una población cuya correlación es cero ($r_{xy} = 0$).

H_1 : El coeficiente de correlación obtenido procede de una población cuyo coeficiente de correlación es distinto de cero ($r_{xy} \neq 0$).

A efectos prácticos, se calcula el número de desviaciones tipo que se encuentra el coeficiente obtenido del centro de la distribución, según la fórmula conocida:

$$t_r = r_{xy}^2 \sqrt{\frac{n-2}{1-r_{xy}^2}}$$

Y se compara el valor obtenido con el existente en las tablas para un cierto nivel de significación α y $n-2$ grados de libertad $t_{(\alpha, n-2)}$. De esta forma si se cumple lo siguiente:

- $t_r > t_{(\alpha, n-2)} \Rightarrow$ Se rechaza la hipótesis nula. La correlación obtenida no procede de una población cuyo valor $r_{xy} = 0$. Por tanto, las variables están relacionadas.
- $t_r \leq t_{(\alpha, n-2)} \Rightarrow$ Se acepta la hipótesis nula. La correlación obtenida no procede de una población cuyo valor $r_{xy} \neq 0$. Por tanto, ambas variables no están relacionadas (Gamarra y colaboradores, 2015).

Nivel de significación

Es importante en una investigación establecer el índice de significación donde no existe fórmula para calcularlo más bien dependerá de que tan controlada este la experimentación y existan los mínimos errores en cada etapa para poder definir si los resultados obtenidos se deben a la gran probabilidad del efecto de la variable independiente, “para el caso de la investigación de la conducta, el porcentaje más usado es el 5 %. Esto significa que, para aceptar la hipótesis nula, es necesario que los eventos hayan sucedido en el 95 % de los casos, y solo el 5 % se deba al azar” (Gamarra y colaboradores, 2015). Mientras más

riguroso sea el valor de α mayor será la probabilidad de cometer un error de tipo II, que es no rechazar la hipótesis nula siendo falsa.

3.13. Técnica de recolección de datos para determinar el nivel de contaminación con relación al ángulo de contacto

La recolección de datos para la investigación fue de observación directa en el laboratorio a través de los equipos de generación de plasma frío a baja presión y el goniómetro digital que esta enlazado al software CAM 100 que nos permitió determinar el ángulo de contacto. De igual manera el generador de plasma frío a baja presión está conectado a un equipo analizador de gases que indica el tipo de gas desprendido durante el proceso en porcentaje o partes por millón. La limpieza superficial de las láminas metálicas utilizadas en productos de línea blanca está directamente relacionada con el ángulo de contacto de la gota de un líquido sobre la superficie de una lámina metálica que determina su grado de limpieza o energía libre superficial, para ello se presenta el plan utilizado en la obtención de los datos para su posterior análisis:

Plan para determinar la influencia del ángulo de contacto en el nivel de los gases generados

Ojetivo: Establecer la influencia del ángulo de contacto obtenido en la limpieza de láminas metálicas con plasma frío a baja presión utilizadas en productos de línea blanca en el nivel de los gases generados

Pregunta: ¿De qué manera el ángulo de contacto obtenido en la limpieza de láminas metálicas con plasma frío a baja presión y utilizadas en productos de línea blanca influye en el nivel de los gases generados?

Fuente:

Láminas metálicas utilizadas
para productos de línea blanca

Localización:

En la ciudad de Cuenca - Ecuador
⇒ en la planta de producción de la
empresa Indurama

Método de recolección de datos:

Observación directa en el goniómetro digital

Forma de preparación de datos:

⇒ Matriz de datos (Ángulo de
contacto)

Observación directa en el analizador
de gases

⇒ Matriz de datos (Gases contami-
nantes)

- 1.- La variable a medir: El nivel de los gases generados
- 2.- Las definiciones operacionales: Gases generados (CO - CO₂ - HC) y ángulo de contacto
- 3.- Tamaño de la muestra: 162
- 4.- Recursos disponibles: Generador de plasma frío a baja presión y goniómetro digital

En los diferentes experimentos de descarga de plasma frío a baja presión sobre las láminas metálicas se considera protocolos de experimentación para garantizar el éxito de la descarga, la repetibilidad del ensayo y la confiabilidad de los datos levantados, estableciendo protocolos para:

- ① El manejo de muestras en el goniómetro óptico
- ② La colocación de la gota del líquido sobre las placas
- ③ La medición del ángulo de contacto

3.13.1. Equipos y materiales

3.13.1.1. Goniómetro Digital

El goniómetro digital fue adquirido a la empresa KSV, modelo CAM 100. Este equipo incluye software para medición del ángulo de contacto y cálculo de la energía libre superficial. Es un equipo de última tecnología que toma 60 fotos por segundo para determinar el ángulo de contacto. El goniómetro de la figura 3.16 puede determinar ángulos entre 0 y 180 grados sexagesimales conformados por la gota del líquido y la superficie de la lámina.



Figura 3.16: **Goniómetro digital.** Fuente: Investigador

3.13.1.2. Líquidos para la determinación del ángulo de contacto

Los fluidos que pueden ser utilizados para la medición del ángulo se muestran en el cuadro 3.12 donde se indican los valores de la energía de la superficie como de los componentes dispersivo y polar.

- **Agua desionizada:** agua desmineralizada es aquella a la que se le han extraído cationes como el sodio, el calcio, el hierro, el cobre y otros, y aniones tales como el carbonato, el fluoruro, el cloruro y otros, mediante un proceso de intercambio iónico. El agua desionizada o agua DI es reactiva, por lo que sus propiedades comienzan a cambiar tan pronto como se expone al aire, tiene un pH de 7 al salir del intercambiador iónico, sin embargo, al entrar en contacto con el dióxido de carbono del aire, el CO₂ disuelto reacciona para producir H(+) y HCO₃(-), llevando el agua hacia la acidificación con un pH cercano a 5,6.(Weissermel y Jurgens, 1981).
- **Etilenglicol:** es un compuesto químico que pertenece al grupo de los dioles. Es un líquido transparente, incoloro, ligeramente espeso como el almíbar y leve sabor dulce, su fórmula es C₂H₆O₂ y se usa comunmente como un agente anticogelante en el sistema de refrigeración del automóvil. También se utiliza en soluciones para deshelar aviones y barcos. (Weissermel y Jurgens, 1981).
- **Diyodometano:** es una sustancia activa y volátil, la estructura del reactivo no se conoce exactamente pero adiciona un grupo metileno a una alta variedad de alquenos, es una sustancia de preparación en laboratorio con una ficha de seguridad y certificado de análisis para su uso, la sustancia debe manipularse con precaución aunque no existan indicaciones especiales.



Figura 3.17: Líquidos para determinar el ángulo de contacto. Fuente: Investigador

Cuadro 3.12: Componentes de la energía libre superficial (mN/m) para los líquidos de prueba.

Líquido de prueba	Energía de superficie (γ)	Componente dispersivo (γ^d)	Componente polar (γ^p)
Agua desionizada	72,80	21,80	51,00
Etilen glicol	48,00	29,00	19,00
Diyodo metano	50,80	50,80	0,00

Fuente: Navrátil y colaboradores (2004)

Para la investigación se utilizó como líquido de prueba el agua desionizada o destilada (desmineralizada) para determinar el ángulo de contacto por su fácil adquisición y costos bajos, además se utilizó una pipeta modelo TB-GP-07+08+09 para regular el volumen exacto del líquido sobre la placa como se observa en la figura 3.18. De igual manera se utilizó una pipeta para colocar el aceite en el centro de la superficie de la lámina metálica, con regulación de 1– 10 ml y con aumento de 100 μ l, con una pantalla de cuatro dígitos para permitir el ajuste del volumen más preciso.



Figura 3.18: Pipetas mecánicas de canal simple de volumen controlable. Fuente: Ewald y Eppendorf (2016)

3.13.2. Protocolos de experimentación en la determinación del ángulo de contacto

Para una correcta recolección de los datos de los ángulos de contacto y que garanticen la confiabilidad y la repetitividad se plantearon los siguientes protocolos de experimentación en cada etapa y para cada uno de los ensayos realizados de acuerdo al procedimiento general presentado en la figura 3.19.

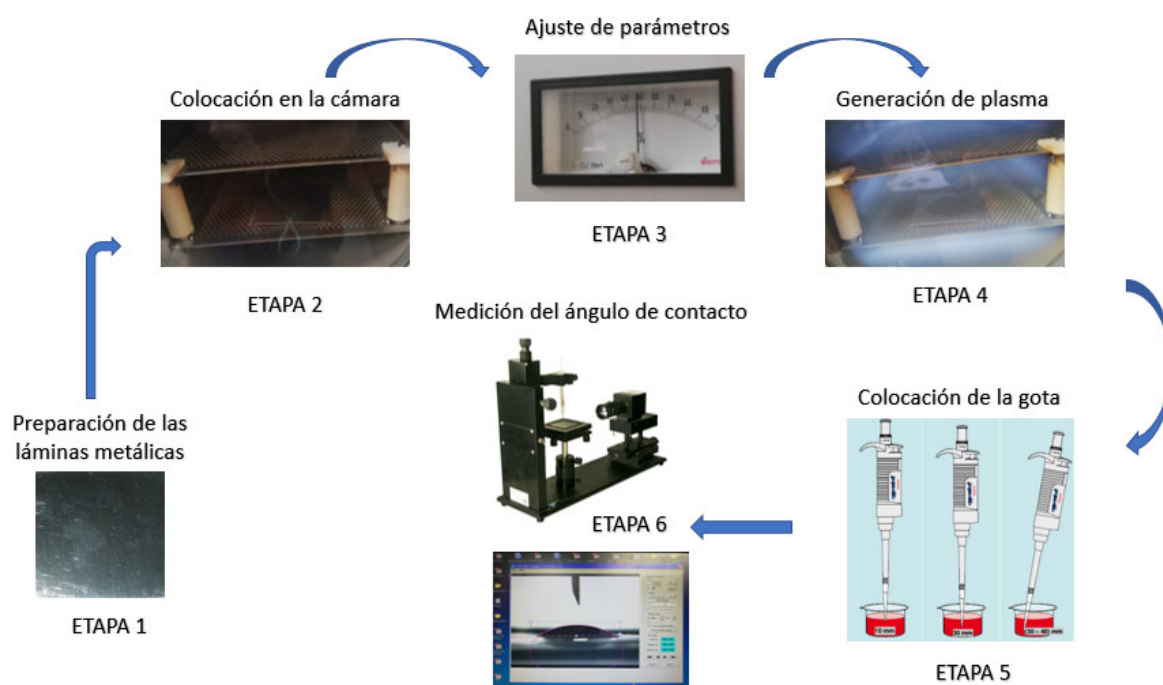


Figura 3.19: **Procedimiento para determinar el ángulo de contacto.** Fuente: Investigador

En el protocolo para la determinación del nivel de los gases de acuerdo al volumen de aceite, se determinó los procedimientos a considerar en las cuatro primeras etapas, por lo que a continuación se analiza los procedimientos en las etapas 5 y 6.

ETAPA 5: Para la colocación de la gota del líquido se consideró el procedimiento de acuerdo a Ewald y Eppendor (2016) para el manejo de pipetas con volúmenes pequeños, donde indican:

1. Las muestras deben ser sujetadas por los extremos laterales.
2. Las muestras deben ser manipuladas de forma horizontal.
3. La colocación del líquido en la superficie debe ser enseguida a la aplicación del plasma.
4. La descarga del líquido en el centro de la lámina (volumen constante de 0,5 ml).
5. Mantener la pipeta en forma vertical al recoger y colocar el líquido (aceite).
6. Mantener la misma profundidad de inmersión de la punta de la pipeta (3 - 5 mm).
7. Mantener los movimientos constantes del pistón, porque demasiado rápido en la aspiración pueden hacer ingresar líquido dentro de la cámara de aire de la micropipeta y movimientos rápidos cuando se entrega líquido pueden dar lugar a la introducción de burbujas de aire.
8. Prehumedecer la punta de la pipeta paso previo al proceso de piveteado

ETAPA 6: Para el manejo de las muestra y la medición del ángulo se consideró:

1. La colocación de la placa en el goniómetro debe ser enseguida de la generación del plasma y posterior colocación del líquido.
2. La medición debe iniciar a continuación de la colocación del líquido dentro de 20 segundos.
3. El receptor y emisor de luz (infrarrojo) deben estar libre de impurezas.

4. La altura del emisor debe ser calibrada siempre en la misma posición vertical para todos los ensayos.
5. La base del goniómetro óptico debe tener posicionadores para una rápida colocación de la lámina o muestra.

3.13.3. Análisis e interpretación de los datos

Una vez que se estableció la dispersión de los datos o se determinó que no son homogéneos se procedió a tomar las muestras para identificar las ppm de cada gas o el nivel de contaminación de cada gas a diferente nivel de limpieza o ángulo de contacto. Para analizar que los datos del nivel de contaminación varían, o no, de acuerdo al grado de limpieza, se planteó un diseño experimental, donde Sampieri y colaboradores (2010), proponen los siguientes lineamientos:

- Estudios de investigación diseñados para probar hipótesis.
- El experimento es el método de investigación más refinado con que se verifican las hipótesis. Experimento tiene dos acepciones una general y una particular. La general referida a una toma de acción y luego observar las consecuencias. La acepción particular se refiere a un estudio en el que se manipulan intencionalmente una o más variables independientes (supuestas causas), para analizar las consecuencias que la manipulación ha generado sobre una o más variables dependientes (supuestos efectos) dentro de una situación de control del investigador.
- En su forma más simple un experimento tiene tres características:
- Se manipula una VI
- Se mantiene constante todas las variables restantes (excepto la VI)
- Se observa el efecto que la manipulación de la VI produce en la VD.

- Las funciones del diseño experimental consiste en establecer las condiciones de las comparaciones que exige las hipótesis del experimento. Además, permite al experimentador hacer una interpretación significativa de los resultados del estudio a través del análisis estadístico de datos.
- Su importancia radica en ofrecer la posibilidad de obtener resultados de mayor exactitud y precisión. Por su forma rigurosa es la más deseada en la investigación científica.
- Se clasifica en experimentos experimentales propiamente dichos.
- Los diseños experimentales son propios de la investigación cuantitativa.

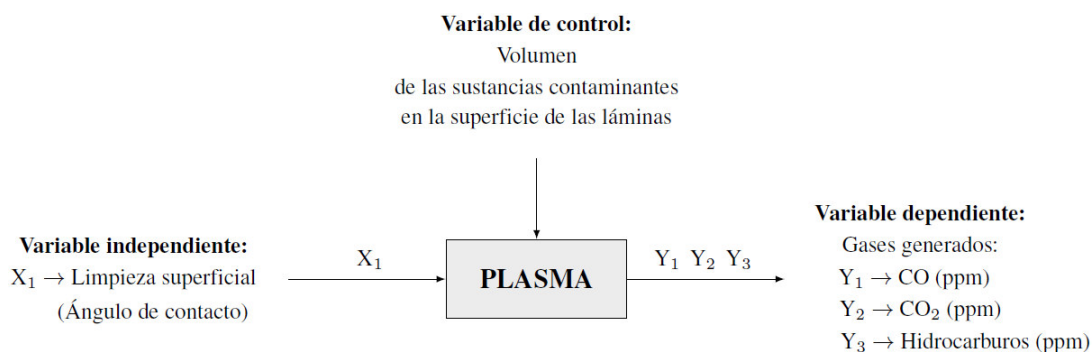


Figura 3.20: **Variables que intervienen en el análisis de datos.** Fuente: Investigador

Una vez se establezca la contaminación de que produzca la limpieza de las láminas metálicas con las condiciones presentadas en la figura 3.20, se procede a ver la homogeneidad de los datos obtenidos en el nivel de contaminación de cada grupo de gas, para determinar la homogeneidad de los datos en cada grupo de acuerdo al ángulo de contacto. Posteriormente la comparación entre los niveles de contaminación entre los grupos de gases para determinar que la contaminación no es la misma para cada grupo.

3.13.4. Prueba de hipótesis

Para la verificación de los supuestos de las hipótesis planteadas en la investigación y sistematizar las relaciones que se pretende encontrar entre el ángulo de contacto y el nivel de los gases generados se plantearon las hipótesis estadísticas para ser evaluadas por medio de técnicas que confirmen o no los supuestos planteados.

Para comprobar o contrastar las hipótesis estadísticas se planteó la prueba de Friedman para más de dos muestras dependientes donde Gamarra y colaboradores (2015) indican que la prueba es no paramétrica donde los grupos de análisis son parecidos entre sí y cuando la muestra es medida bajo dos o más condiciones se generan dos o más muestras dependientes.

las hipótesis que se plantean son:

$$\text{Hipótesis de Friedman} \begin{cases} H_0 : \text{No existe diferencia entre los grupos} \\ H_1 : \text{Existe diferencia entre los grupos} \end{cases}$$

Para resolver el contraste de hipótesis planteadas Gamarra y colaboradores (2015) indican que:

Friedman propuso un estadístico que se distribuye como un chi-cuadrado con $(K - 1)$ grados de libertad, siendo K el número de variables relacionadas, se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\chi_F^2 = \frac{12}{HK(K+1)} \sum R_c^2 - 3H(K+1)$$

En la expresión anterior:

χ_F^2 : Valor estadístico calculado del análisis de varianza por rangos de Friedman.

H: Número de filas

K: Número de columnas

$\sum Rc^2$: Es la suma de rangos por columnas al cuadrado

Procedimiento para determinar la prueba de Friedman:

- 1.- Hacer una tabla en la que K variables, es decir, las K medidas estén en las columnas y los n elementos en las filas, de esta manera la tabla tendrá K columnas y n filas.
- 2.- A los valores de cada fila se les asigna un número del 1 al K, según el orden de magnitud de menor a mayor, a este número se le denomina rango.
- 3.- Se suman los respectivos rangos en función de las columnas.
- 4.- Aplicar la fórmula de análisis de varianza de doble entrada por rangos de Friedman.
- 5.- Comparar el valor de χ_F^2 de Friedman con tablas de valores críticos de chi-cuadrado de Pearson. (p.228)

Nivel de significación

De igual manera se utiliza el mismo criterio de la primera hipótesis para la elección del nivel de significación.

3.14. Técnica de recolección de datos para determinar el nivel de contaminación con relación al volumen de aceite y el ángulo de contacto

Para la determinar la incidencia del volumen de aceite y el ángulo de contacto en el nivel de contaminación generado en el proceso, la obtención de los datos fue de observación directa en los equipos de laboratorio utilizando los protocolos y técnicas expuestas en las secciones anteriores.

3.14.1. Análisis e interpretación de los datos

Para el análisis de los datos se estableció utilizar una estadística multivariada con el método de regresión múltiple que consiste en “evaluar el efecto de dos o más variables independientes sobre una variable dependiente, así como predecir el valor de la variable dependiente con una o más variables independientes, y estimar cuál es la independencia que mejor predice las puntuaciones de la dependiente” (Sampieri y colaboradores, 2010).

La notación matemática del modelo o ecuación de regresión lineal múltiple esta definida por la ecuación:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n + e$$

donde:

Y	es la variable a predecir
$\beta_0, \beta_1, \beta_2 \dots \beta_n$	son parámetros desconocidos a estimar
e	es el error que cometemos en la predicción de los parámetros

3.14.2. Prueba de hipótesis

Resumen del modelo

En el resumen del modelo se establecen los valores del coeficiente **R** y el coeficiente de determinación **R cuadrado**, donde el coeficiente R refleja el grado de correlación existente entre la variable dependiente y las variables independientes tomadas en conjunto y R cuadrado indica el porcentaje que posiblemente la variable dependiente podría ser determinada por las variables independientes y el porcentaje restante conocido como el coeficiente de alienación, se debería a otros factores no incluidos en el modelo multivariante. El R cuadrado ajustado indica una corrección del efecto cantidad de predictores o cantidad de variables independientes (tamaño del modelo), que permite tener una lectura más precisa del poder explicativo del modelo multivariante y el error estándar de la estimación que indica la desviación media de los pronósticos generados por el modelo de regresión con respecto a los valores reales de la variable dependiente (Zumárraga, 2018).

Coeficiente Durbin Watson

El Test de Durbin-Watson permite evaluar si existe autocorrelación en una Regresión lineal, sea simple o múltiple. Con ello se pretende ver si los valores presentan algún tipo de dependencia en cuanto al orden de obtención. Si fuera así se estaría incumpliendo una de las condiciones del modelo y cuando se incumplen las condiciones de un modelo de Regresión lineal (normalidad, homogeneidad de varianzas, independencia de los datos) las estimaciones de los parámetros del modelo (los coeficientes del modelo) no tienen los criterios de calidad que se suponen. Por ejemplo, la desviación estándar de esas estimaciones (el llamado error estándar) aumenta, etc. Este Test lo que hace es evaluar si la disposición de los valores en función de las variables independientes es una disposición al azar o, por el contrario, si hay algún tipo de dependencia, algún tipo de conexión entre los valores. (Llopis, 2019)

Análisis ANOVA

Para el análisis Anova, se analiza el estadístico F como el valor-p (sig.) que en consecuencia determinan si las variables independientes están significativamente o no relacionadas con la variable dependiente.

Evaluación de los parámetros del Modelo Multivariante

Zumárraga (2018), indica que el cuadro coeficientes proporciona la información necesaria para evaluar los parámetros del modelo multivariante de forma particularizada donde se puede observar la constante del modelo β_0 , como los coeficientes de regresión $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$, donde el cuadro de coeficientes proporciona la información necesaria para evaluar el modelo multivariante de forma particularizada donde todos los coeficientes $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$, son diferentes de cero y estadísticamente significativos, por lo tanto, las hipótesis planteadas son:

$$\text{Regresión múltiple} \quad \begin{cases} H_0 : \beta_0 = 0, \beta_1 = 0, \beta_2 = 0, \dots, \beta_n = 0 \\ H_1 : \beta_0 \neq 0, \beta_1 \neq 0, \beta_2 \neq 0, \dots, \beta_n \neq 0 \end{cases}$$

Valor de la Varianza Inflada VIF

Es importante analizar el valor de la varianza inflada VIF, el cual es un coeficiente que me permite analizar si existe o no multicolinealidad, es decir correlación entre las variables independientes que es uno de los supuestos que me permite validar el modelo, este coeficiente VIF debe estar cercano a 1 para cada variable lo que me indicaría que estas son independientes. En caso de que el valor VIF sea mayor a 10 me genera un problema con el modelo de regresión ya que me indica que existe multicolinealidad por lo que habría que hacer otro análisis eliminando una de las variables que genera esta multicolinealidad. Adicional es importante analizar que en caso de que si bien ninguna de las variables supera

el valor de p pero existen algunas variables con valores entre 6 a 9 también deberíamos preocuparnos ya que indica que existe multicolinealidad (Molina, 2019; Zumárraga, 2018).

La colinealidad es un grave problema para el modelo multivariable, ya que las estimaciones obtenidas por el mismo son muy inestables, al hacerse más difícil separar el efecto de cada variable predictora (Molina, 2019).

Correlaciones de Orden Cero

Constituyen las correlaciones bivariadas de Pearson entre cada uno de los predictores y la variable dependiente.

Correlaciones Parciales

El coeficiente de correlación parcial evalúa el grado de asociación que existe entre dos variables una vez se extrae el efecto o la variabilidad explicada por el resto de variables que conforman el modelo. En este caso, la correlación parcial constituye un procedimiento estadísticamente equivalente a los diseños experimentales con control de variables, puesto que al extraer la variabilidad explicada por el resto de variables del modelo tanto para la variable dependiente como para el predictor de interés, lo que queda son los residuos de dichas variables. En este punto se busca correlacionar los residuos, y en el caso de que éstos se correlacionen efectivamente, se interpreta que las variables están asociadas incluso si se las demás variables del modelo se mantienen constantes.

Correlaciones Semiparciales

El coeficiente de correlación semiparcial opera bajo la misma lógica que las correlaciones parciales, no obstante, en este caso únicamente se controla el efecto de los predictores sobre el predictor de interés, y no sobre la variable dependiente. Es decir, si se tienen las variables y_i como independiente y x_1, x_2 como predictores; el coeficiente de correlación

semiparcial entre y_i y x_1 refleja el grado de relación existente entre dichas variables cuando se controla el efecto de x_2 solo para x_1 . Es decir, este tipo de correlación controla el efecto de terceras variables pero solo a nivel de predictores. Esto permite evaluar cuál es el aporte explicativo específico que cada predictor tiene sobre la variable dependiente, puesto que cuando se tienen dos o más predictores en un modelo de regresión, dichos predictores pueden estar asociados entre sí (multicolinealidad).

CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Análisis del nivel de contaminación por plasma frío a baja presión en la limpieza de láminas metálicas utilizadas en productos de línea blanca de acuerdo al volumen de aceite contaminante

Para analizar los gases generados en el proceso de limpieza por plasma frío a baja presión se realizó un análisis de las variables que intervienen en el proceso como se indica en la figura 4.1. Las muestras fueron extraídas de la línea de producción y transportadas directamente al laboratorio para ser tratadas con una descarga de gas ionizado en el generador de plasma frío a baja presión.

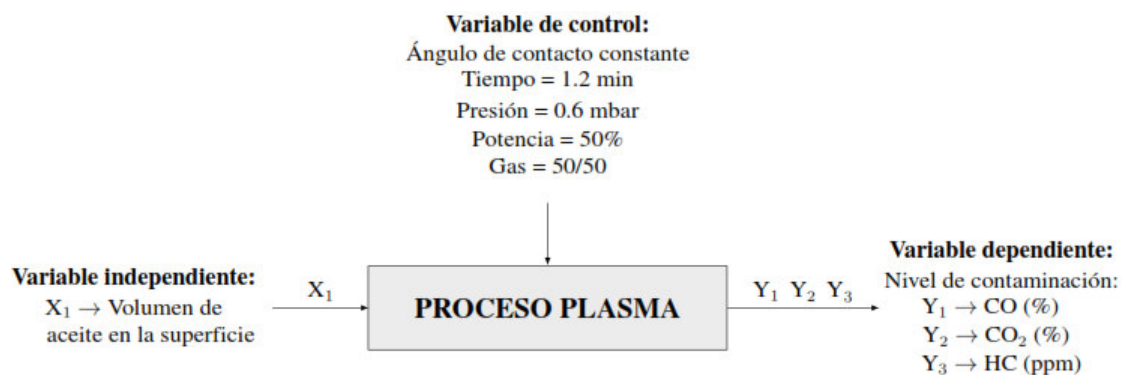


Figura 4.1: **Variables en la determinación del nivel de contaminación.** Fuente: Investigador

Se extrajeron 162 muestras para los diferentes ensayos de acuerdo al número de muestras

calculado, el cuadro 4.2 presenta los resultados obtenidos y la tabla 4.1 presenta los parámetros colocados en el generador de plasma en estudios anteriores de Sarmiento y colaboradores (2012) relacionados con investigaciones de limpieza de láminas metálicas.

Cuadro 4.1: Parámetros del generador de plasma

PARÁMETROS	
Tiempo	1.2 min
Presión	0,6 bar
Potencia	50 %
Gas	50/50

Fuente: Investigador

Cuadro 4.2: Gases generados en la limpieza superficial.

Nº	Volumen en ml	Ángulo de contacto	CO (%)	CO2 (%)	HC (ppm)	O2 (%)	NOX (%)
1	12,35	69,8	0,252	0,1	895,2	—	—
2	13,44	69,7	0,260	0,1	897,8	—	—
3	15,22	69,6	0,310	0,1	973,4	—	—
4	8,23	69,7	0,261	0,1	894,8	—	—
5	17,49	69,5	0,385	0,1	964,2	—	—
6	8,65	69,0	0,251	0,1	839,6	—	—
7	9,36	69,8	0,264	0,1	906,5	—	—
8	12,93	69,6	0,310	0,1	960,3	—	—
9	13,46	69,4	0,322	0,1	960,7	—	—
10	16,78	69,5	0,362	0,2	1006,1	—	—
11	25,02	69,5	0,427	0,2	1222,6	—	—
12	9,46	70,1	0,254	0,1	891,1	—	—
13	8,31	69,9	0,249	0,1	848,8	—	—
14	15,38	69,7	0,262	0,1	917,3	—	—

Continuación: Cuadro 4.2

Nº	Volumen en ml	Ángulo de contacto	CO (%)	CO2 (%)	HC (ppm)	O2 (%)	NOX (%)
15	18,24	69,1	0,432	0,2	1008,4	—	—
16	26,32	68,7	0,459	0,3	1248,4	—	—
17	9,78	70,1	0,263	0,1	889,7	—	—
18	14,67	67,7	0,318	0,1	962,8	—	—
19	24,36	69,1	0,451	0,2	1198,9	—	—
20	15,65	67,8	0,427	0,2	1109,3	—	—
21	19,12	68,4	0,403	0,2	999,4	—	—
22	12,34	69,8	0,304	0,1	968,7	—	—
23	21,16	68,9	0,436	0,2	1157,2	—	—
24	25,69	69,0	0,473	0,3	1233,0	—	—
25	8,19	69,8	0,259	0,1	894,2	—	—
26	23,11	68,7	0,417	0,2	1178,4	—	—
27	7,23	69,8	0,238	0,1	866,4	—	—
28	23,56	69,7	0,451	0,3	1184,2	—	—
29	25,12	69,7	0,458	0,3	1270,5	—	—
30	8,17	70,1	0,264	0,1	893,4	—	—
31	12,72	68,9	0,273	0,1	962,4	—	—
32	16,26	68,1	0,359	0,2	971,4	—	—
33	17,34	68,9	0,406	0,2	993,0	—	—
34	18,45	70,00	0,361	0,2	1061,8	—	—
35	24,12	67,9	0,439	0,2	1278,0	—	—
36	23,68	71,9	0,433	0,2	1010,4	—	—
37	10,12	69,7	0,270	0,1	932,4	—	—
38	11,24	67,5	0,290	0,1	952,4	—	—
39	13,42	69,3	0,263	0,1	967,4	—	—
40	9,56	71,1	0,248	0,1	914,7	—	—
41	15,70	67,8	0,366	0,1	919,6	—	—
42	28,34	68,4	0,481	0,3	1253,5	—	—
43	18,66	67,7	0,454	0,2	996,9	—	—
44	19,23	69,9	0,462	0,2	1065,7	—	—
45	12,11	68,9	0,297	0,1	951,4	—	—

Continuación: Cuadro 4.2

Nº	Volumen en ml	Ángulo de contacto	CO (%)	CO2 (%)	HC (ppm)	O2 (%)	NOX (%)
46	23,48	67,1	0,463	0,3	1210,3	—	—
47	34,20	69,9	0,501	0,3	1332,6	—	—
48	9,23	70,3	0,270	0,1	952,8	—	—
49	13,45	67,8	0,323	0,1	966,4	—	—
50	18,46	67,4	0,368	0,2	994,7	—	—
51	17,58	68,3	0,366	0,2	999,6	—	—
52	23,13	70,0	0,437	0,2	1177,5	—	—
53	9,44	70,1	0,254	0,1	926,9	—	—
54	8,77	69,9	0,242	0,1	885,7	—	—
55	28,12	69,8	0,457	0,3	1251,4	—	—
56	22,19	69,8	0,451	0,3	1221,4	—	—
57	27,15	69,4	0,468	0,3	1250,5	—	—
58	17,59	67,5	0,356	0,2	989,6	—	—
59	12,67	70,9	0,292	0,1	964,2	—	—
60	17,34	69,7	0,358	0,2	995,0	—	—
61	15,37	68,8	0,351	0,2	1084,4	—	—
62	23,25	69,9	0,432	0,2	1075,3	—	—
63	27,24	70,1	0,486	0,3	1236,1	—	—
64	35,23	69,2	0,553	0,3	1346,5	—	—
65	12,11	67,9	0,297	0,1	965,6	—	—
66	14,28	69,3	0,319	0,1	977,4	—	—
67	17,31	67,8	0,407	0,2	985,8	—	—
68	18,98	69,7	0,369	0,2	991,1	—	—
69	12,27	69,1	0,304	0,1	996,8	—	—
70	9,23	67,8	0,263	0,1	916,6	—	—
71	29,18	70,7	0,467	0,3	1251,2	—	—
72	15,33	67,9	0,330	0,2	985,4	—	—
73	25,16	68,4	0,462	0,3	1236,7	—	—
74	6,13	68,6	0,239	0,1	873,7	—	—
75	22,18	70,8	0,419	0,2	1095,4	—	—
76	27,27	69,7	0,473	0,3	1224,7	—	—

Continuación: Cuadro 4.2

Nº	Volumen en ml	Ángulo de contacto	CO (%)	CO2 (%)	HC (ppm)	O2 (%)	NOX (%)
77	23,68	70,1	0,428	0,2	1170,3	—	—
78	12,89	68,7	0,299	0,1	971,4	—	—
79	32,46	67,9	0,523	0,3	1312,1	—	—
80	29,34	68,6	0,487	0,3	1349,7	—	—
81	25,75	69,6	0,452	0,3	1244,5	—	—
82	30,26	70,8	0,479	0,3	1336,5	—	—
83	20,03	70,5	0,439	0,2	1130,2	—	—
84	8,35	67,8	0,230	0,1	919,2	—	—
85	11,08	69,9	0,294	0,1	963	—	—
86	12,56	67,8	0,306	0,1	953,6	—	—
87	17,75	70,2	0,358	0,2	991,9	—	—
88	29,88	68,9	0,467	0,3	1236,6	—	—
89	7,11	67,9	0,223	0,1	886,1	—	—
90	29,45	71,5	0,460	0,3	1249,1	—	—
91	12,55	70,8	0,291	0,1	967,0	—	—
92	11,65	70,2	0,262	0,1	973,3	—	—
93	8,03	69,7	0,261	0,1	906,9	—	—
94	9,24	68,8	0,269	0,1	921,3	—	—
95	11,18	68,9	0,290	0,1	961,9	—	—
96	9,08	69,9	0,256	0,1	919,7	—	—
97	27,34	68,6	0,453	0,3	1201,5	—	—
98	22,96	68,9	0,439	0,2	1129,6	—	—
99	31,12	67,1	0,470	0,3	1345,8	—	—
100	24,67	70,9	0,437	0,2	1118,3	—	—
101	12,53	70,1	0,299	0,1	957,5	—	—
102	29,23	69,6	0,476	0,3	1239,8	—	—
103	15,07	69,7	0,359	0,2	995,4	—	—
104	32,25	69,7	0,517	0,3	1322,3	—	—
105	23,31	68,9	0,426	0,2	1198,0	—	—
106	28,75	68,7	0,473	0,3	1220,3	—	—
107	34,03	69,6	0,509	0,3	1347,1	—	—

Continuación: Cuadro 4.2

Nº	Volumen en ml	Ángulo de contacto	CO (%)	CO2 (%)	HC (ppm)	O2 (%)	NOX (%)
108	12,45	70,3	0,312	0,1	969,2	—	—
109	35,67	68,1	0,523	0,3	1346,5	—	—
110	28,42	68,4	0,471	0,3	1247,4	—	—
111	32,07	69,2	0,490	0,3	1311,8	—	—
112	21,85	67,7	0,428	0,2	1190,5	—	—
113	9,36	68,7	0,268	0,1	912,6	—	—
114	23,25	70,1	0,419	0,2	1154,8	—	—
115	35,24	69,4	0,506	0,3	1348,1	—	—
116	9,39	69,8	0,263	0,1	916,0	—	—
117	6,12	70,9	0,219	0,1	883,9	—	—
118	14,25	68,6	0,301	0,1	924,0	—	—
119	31,23	68,7	0,480	0,3	1373,6	—	—
120	27,75	71,9	0,463	0,3	1249,6	—	—
121	23,94	65,9	0,457	0,3	1243,1	—	—
122	29,91	68,9	0,488	0,3	1222,9	—	—
123	9,62	69,2	0,259	0,1	915,9	—	—
124	9,35	67,9	0,270	0,1	897,5	—	—
125	13,72	70,6	0,294	0,1	972,1	—	—
126	31,08	67,9	0,493	0,3	1311,4	—	—
127	21,16	68,9	0,419	0,2	1156,1	—	—
128	28,09	67,5	0,470	0,3	1236,2	—	—
129	12,03	69,9	0,306	0,1	951,0	—	—
130	23,78	67,9	0,422	0,2	1196,9	—	—
131	37,89	68,5	0,558	0,3	1351,3	—	—
132	27,41	69,3	0,462	0,3	1227,1	—	—
133	11,21	67,6	0,299	0,1	924,7	—	—
134	17,93	68,2	0,357	0,2	992,1	—	—
135	26,71	67,9	0,467	0,3	1253,9	—	—
136	26,48	69,1	0,463	0,3	1212,6	—	—
137	18,66	69,8	0,389	0,2	988,0	—	—
138	27,34	69,9	0,467	0,3	1232,5	—	—

Continuación: Cuadro 4.2

Nº	Volumen en ml	Ángulo de contacto	CO (%)	CO2 (%)	HC (ppm)	O2 (%)	NOX (%)
139	23,93	68,9	0,426	0,2	1187,5	—	—
140	25,34	69,7	0,458	0,3	1233,0	—	—
141	12,07	69,8	0,316	0,1	971,1	—	—
142	24,56	68,8	0,439	0,2	1152,3	—	—
143	8,25	71,7	0,253	0,1	912,9	—	—
144	15,23	70,8	0,317	0,1	966,7	—	—
145	17,46	69,7	0,336	0,2	1008,9	—	—
146	19,35	70,3	0,403	0,2	1057,7	—	—
147	24,56	69,7	0,422	0,2	1143,9	—	—
148	26,12	71,7	0,468	0,3	1203,4	—	—
149	9,07	68,7	0,269	0,1	918,9	—	—
150	17,22	69,8	0,377	0,2	987,9	—	—
151	16,49	69,4	0,392	0,2	1121,3	—	—
152	19,93	68,9	0,403	0,2	995,0	—	—
153	21,78	67,9	0,420	0,2	1187,7	—	—
154	10,37	68,2	0,297	0,1	927,4	—	—
155	23,76	71,1	0,427	0,2	1170,5	—	—
156	15,78	70,8	0,369	0,2	984,8	—	—
157	18,61	69,6	0,397	0,2	1025,3	—	—
158	34,27	70,7	0,520	0,3	1342,7	—	—
159	27,39	68,3	0,467	0,3	1234,2	—	—
160	18,17	68,6	0,371	0,2	997,4	—	—
161	9,95	69,9	0,252	0,1	915,5	—	—
162	11,27	69,0	0,296	0,1	956,3	—	—

Fuente: Investigador

4.1.1. Análisis, interpretación y discusión de los resultados

Los gases generados en la limpieza de láminas metálicas y detectados por el analizador fueron:

GAS	MEDIDA	PRESENCIA
Dioxido de carbono (CO ₂)	(%)	Detectado
Monoxido de carbono (CO)	(%)	Detectado
Hidrocarburos (HC)	(ppm)	Detectado
Óxidos de nitrógeno (NO _x)	(ppm)	No detectado
Oxigeno (O ₂)	(%)	No detectado

El aceite lubricante es una combinación de espesantes, aceite de diferente origen y aditivos para mejorar las prestaciones industriales, dependiendo de cómo fue refinado y modificado para eliminar componentes como ceras, azufres y nitrógeno que no son necesarios en éste tipo de aceite es incierto determinar su composición química exacta pero de acuerdo a los resultados obtenidos se observa que el aceite no contiene nitrógeno por tal motivo no existe la presencia de óxidos de nitrógeno, el oxígeno a reaccionado con el carbono produciendo monóxido y dióxido de carbono y a su vez liberando los hidrocarburos que son cadenas moleculares a base de carbono con hidrógeno, es decir el oxígeno con el argón rompieron cadenas largas de carbono y formaron compuestos de hasta 4 carbonos que comúnmente son los gases de hidrocarburos detectados en el analizador (Cruz y colaboradores, 2008; Trujillo, 2012).

El generador de plasma es de baja presión, por la tanto trabaja a una atmósfera y además es frío por lo que se encuentra a temperatura ambiente, en éste contexto junto a que los gases desprendidos forman cadenas cortas de carbono y de acuerdo a las propiedades físicas de los hidrocarburos; los gases presentes serían el metano (CH₄), cual es un combustible

gaseoso componente del gas natural, etano (C_2H_6), propano (C_3H_8) y butano (C_4H_{10}). Es necesario considerar que puede existir de acuerdo a la ionización generada en la cámara presencia de algunos hidrocarburos alquenos como el eteno o etileno (C_2H_4) u otro gas de cadena de carbono corta (Cruz y colaboradores, 2008; Trujillo, 2012).

Una vez determinado los valores se realizó un análisis de dispersión de los datos para el volumen del líquido, monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), los hidrocarburos (HC) y el ángulo de contacto. La desviación estándar indicó como están agrupados los datos con respecto a su media aritmética, y los valores calculados se indican en el cuadro 4.3.

Cuadro 4.3: Dispersión de los datos obtenidos.

Desviación estándar	$s = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{N-1}}$
Descripción	s con \angle constante
Volumen de aceite	7,920468455
Ángulo de contacto	1,035085525
Monóxido de carbono CO	0,088919882
Dióxido de carbono CO_2	0,081902836
Hidrocarburos HC	182,5632126

Fuente: Investigador

Como se observa en los resultados del cuadro 4.3, el ángulo de contacto no varía significativamente o se puede decir que sus valores permanecen más agrupados a su media aritmética, debido a que a pesar de los diferentes volúmenes de aceite desprendido con los parámetros programados en el generador de plasma siempre se mantiene una cantidad de aceite constante en la superficie, eso se debe a la tensión superficial que ejerce la superficie de la lámina con el aceite debido a la composición química de las láminas metálicas y a su acabado microestructural, se puede observar los resultados de ésta explicación físico -

química en las filas 143 y 158 del cuadro 4.2. Se observa que la dispersión de los datos del volumen de aceite es elevado y es debido a que se tomaron muestras al azar de láminas con aceite de la planta de producción; los valores de los hidrocarburos también presentan una gran dispersión debido a los cambios de volumen del aceite donde se comprobó con una prueba de hipótesis junto con los datos del monóxido de carbono y dióxido de carbono.

4.1.2. Pruebas de hipótesis 1

Dentro de la investigación se pretende determinar si existe la influencia del volumen de aceite en la determinación de los gases generados en la limpieza de láminas metálicas utilizadas en productos de línea blanca y si existe una correlación entre estas variables analizadas.

Hipótesis específica 1

El nivel de contaminación por plasma frío a baja presión se analizará en la limpieza de láminas metálicas utilizadas en productos de línea blanca de acuerdo con el volumen de aceite contaminante.

Hipótesis estadísticas

$H_0 : Q = 0$ No existe asociación entre el volumen de aceite sobre la lámina metálica y el nivel de contaminación en la limpieza de láminas metálicas

$H_1 : Q \neq 0$ Existe asociación entre el volumen de aceite sobre la lámina metálica y el nivel de contaminación en la limpieza de láminas metálicas

Nivel de significación

El nivel de significación elegido es: $\alpha = 0.05$ (5 %)

Modelo estadístico

El modelo estadístico que se utilizó es el coeficiente de correlación de Pearson que indica la correlación lineal entre el volumen de aceite y el nivel de los gases generados.

4.1.3. Presentación de resultados y toma de decisión

Se utilizó el software estadístico SPSS para determinar si existe correlación entre el volumen del aceite y el nivel de los gases detectados, presentando los siguientes resultados:

• Monóxido de Carbono (CO):

Para el cálculo del coeficiente de Pearson se consideró “Y” para el nivel de monóxido de carbono CO y “X” el volumen de aceite.

Cuadro 4.4: Datos para el coeficiente r_{xy} de Pearson para el CO.

Nº	X	Y	X ²	Y ²	XY
1	12,35	0,252	152,5225	0,0635	3,1122
2	13,44	0,260	180,6336	0,0676	3,4944
3	15,22	0,310	231,6484	0,0961	4,7182
...
...
162	11,27	0,296	127,0129	0,0876	3,3359
$\Sigma X = 3080,93$ $\Sigma Y = 60,912$ $\Sigma X^2 = 68693,5381$ $\Sigma Y^2 = 24,1758$ $\Sigma XY = 1267,6789$					

Fuente: Investigador

Luego:

$$r_{xy} = \frac{n(\sum XY) - (\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{[n\sum X^2 - (\sum X)^2][n\sum Y^2 - (\sum Y)^2]}}$$

Remplazando valores:

$$r_{xy} = \frac{162(1267,6789) - (3080,93)(60,912)}{\sqrt{[162(68693,5381) - (3080,93)^2][162(24,1758) - (60,912)^2]}}$$

$$r_{xy} = 0,963$$

Cálculo de la estadística muestral:

$$t_r = r_{xy}^2 \sqrt{\frac{n-2}{1-r_{xy}^2}}$$

Remplazando valores:

$$t_r = 0,963^2 \sqrt{\frac{162-2}{1-0,963^2}}$$

$$t_r = 43,5262$$

En la tabla t Student al 5 % de nivel de significancia y con 160 grados de libertad se tiene el valor encontrado de $t_{(0,05;160)} = 1,960$. Para el análisis se determina que $t_r = 43,52$ es mayor que $t_{(0,05;160)} = 1,960$, entonces rechazamos la hipótesis nula con un riesgo máximo de equivocarnos de 0,05.

Cuadro 4.5: **Correlación: volumen del aceite y monóxido de carbono.**

Correlaciones		Volumen del aceite	Monóxido de carbono
Volumen del aceite	Correlación de Pearson	1	,963**
	Sig. (bilateral)		,000
	N	162	162
Monóxido de carbono	Correlación de Pearson	,963**	1
	Sig. (bilateral)	,000	
	N	162	162

** . La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

Fuente: Software SPSS

En el cuadro 4.5 se observa que la Sig. (bilateral) para las variables volumen de aceite y monóxido de carbono donde la probabilidad $p = 0,000 < \alpha = 0,05$, por lo que se rechaza la hipótesis nula. La correlación encontrada es estadísticamente significativa al nivel de significación del 5 %, como se observa en la figura 4.2.

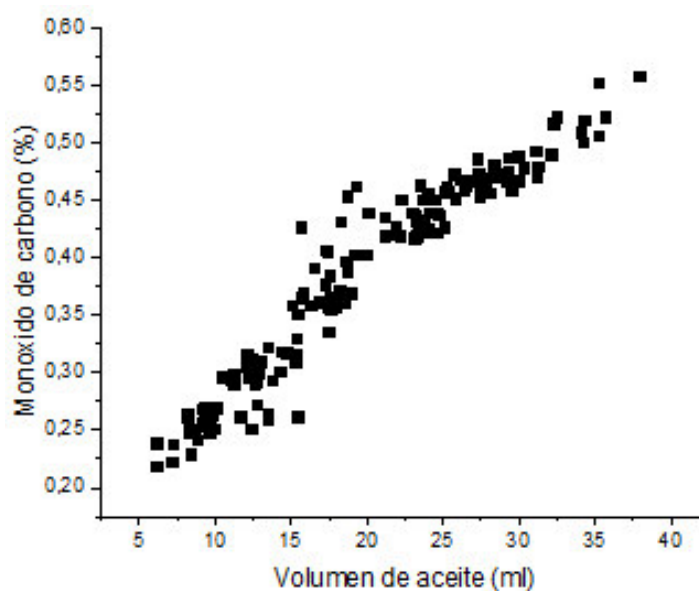


Figura 4.2: **Correlación de las variables: Volumen - %CO.** Fuente: Software OriginPro

• **Dióxido de Carbono (CO₂):**

Para el cálculo del coeficiente de Pearson se consideró “Y” para el nivel de monóxido de carbono CO y “X” el volumen de aceite.

Cuadro 4.6: Datos para el coeficiente r_{xy} de Pearson para el CO₂.

Nº	X	Y	X ²	Y ²	XY
1	12,35	0,1	152,5225	0,01	1,235
2	13,44	0,1	180,6336	0,01	1,344
3	15,22	0,1	231,6484	0,01	1,522
...
...
162	11,27	0,1	127,0129	0,01	1,127
$\Sigma X = 3080,93$ $\Sigma Y = 30,60$ $\Sigma X^2 = 68693,5381$ $\Sigma Y^2 = 6,86$ $\Sigma XY = 674,107$					

Fuente: Investigador

Luego:

$$r_{xy} = \frac{n(\Sigma XY) - (\Sigma X)(\Sigma Y)}{\sqrt{[n\Sigma X^2 - (\Sigma X)^2][n\Sigma Y^2 - (\Sigma Y)^2]}}$$

Remplazando valores:

$$r_{xy} = \frac{162(674,107) - (3080,93)(30,60)}{\sqrt{[162(68693,5381) - (3080,93)^2][162(6,86) - (30,60)^2]}}$$

$$r_{xy} = 0,882$$

Cálculo de la estadística muestral:

$$t_r = r_{xy}^2 \sqrt{\frac{n-2}{1-r_{xy}^2}}$$

Remplazando valores:

$$t_r = 0,882^2 \sqrt{\frac{162-2}{1-0,882^2}}$$

$$t_r = 20,88$$

En la tabla t Student al 5 % de nivel de significancia y con 160 grados de libertad se tiene el valor encontrado de $t_{(0,05;160)} = 1,960$. Para el análisis se determina que $t_r = 20,88$ es mayor que $t_{(0,05;160)} = 1,960$, entonces rechazamos la hipótesis nula con un riesgo máximo de equivocarnos de 0,05.

Cuadro 4.7: Correlación: volumen del aceite y dióxido de carbono.

Correlaciones			
		Volumen del aceite	Dióxido de carbono
Volumen del aceite	Correlación de Pearson	1	,882**
	Sig. (bilateral)		,000
	N	162	162
Dióxido de carbono	Correlación de Pearson	,882**	1
	Sig. (bilateral)	,000	
	N	162	162

** . La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

Fuente: Software SPSS

En el cuadro 4.7 se observa que la Sig. (bilateral) para las variables volumen de aceite y dióxido de carbono donde la probabilidad $p = 0,000 < \alpha = 0,05$, por lo que se rechaza

la hipótesis nula. La correlación encontrada es estadísticamente significativa al nivel de significación del 5 %, la figura 4.3 muestra el incremento del dióxido de carbono con respecto al volumen (función escalonada), y se observan algunos datos anómalos debido a algún error ya sea instrumental, personal o accidental.

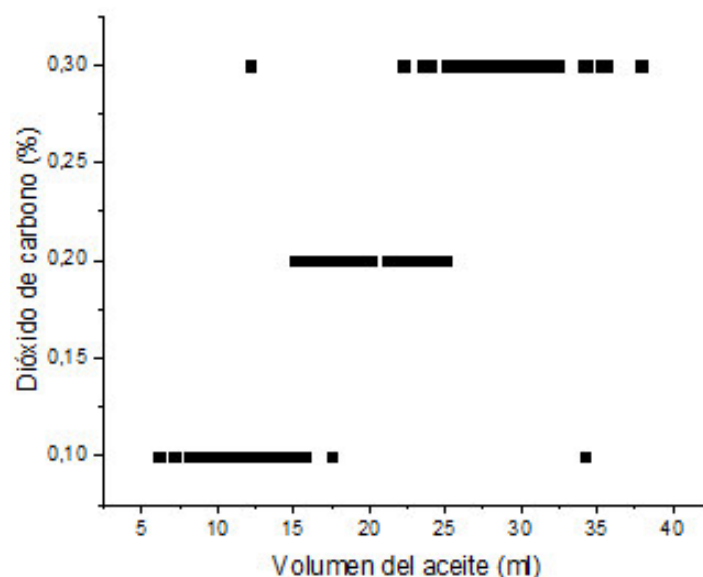


Figura 4.3: **Correlación de las variables: Volumen - % CO₂**. Fuente: Software OriginPro

• Hidrocarburos (HC):

Para el cálculo del coeficiente de Pearson se consideró “Y” para el nivel de los hidrocarburos y “X” el volumen de aceite. El cuadro 4.8 indican los valores utilizados para el cálculo del coeficiente de Pearson r_{xy} , que posteriormente se utilizó en el cálculo estadístico de t_r para aceptar o rechazar la hipótesis nula como se muestra a continuación.

Cuadro 4.8: Datos para el coeficiente r_{xy} de Pearson para los hidrocarburos HC.

Nº	X	Y	X ²	Y ²	XY
1	12,35	895,2	152,5225	801383,04	11055,720
2	13,44	897,8	180,6336	806044,84	12066,432
3	15,22	973,4	231,6484	947507,56	14815,148
...
...
162	11,27	956,3	127,0129	914509,69	10777,501
<hr/>					
	$\Sigma X =$	$\Sigma Y =$	$\Sigma X^2 =$	$\Sigma Y^2 =$	$\Sigma XY =$
	3080,93	171789,20	68693,5381	187535955,14	3431681,20

Fuente: Investigador

Luego:

$$r_{xy} = \frac{n(\Sigma XY) - (\Sigma X)(\Sigma Y)}{\sqrt{[n\Sigma X^2 - (\Sigma X)^2][n\Sigma Y^2 - (\Sigma Y)^2]}}$$

Remplazando valores:

$$r_{xy} = \frac{162(3431681,20) - (3080,93)(171789,20)}{\sqrt{[162(68693,5381) - (3080,93)^2][162(187535955,14) - (171789,93)^2]}}$$

$$r_{xy} = 0,707$$

Cálculo de la estadística muestral:

$$t_r = r_{xy}^2 \sqrt{\frac{n-2}{1-r_{xy}^2}}$$

Remplazando valores:

$$t_r = 0,707^2 \sqrt{\frac{162 - 2}{1 - 0,707^2}}$$

$$t_r = 8,94$$

En la tabla t Student al 5 % de nivel de significancia y con 160 grados de libertad se tiene el valor encontrado de $t_{(0,05;160)} = 1,960$. Para el análisis se determina que $t_r = 8,94$ es mayor que $t_{(0,05;160)} = 1,960$, entonces rechazamos la hipótesis nula con un riesgo máximo de equivocarnos de 0,05.

En el cuadro 4.9 se observa que la Sig. (bilateral) para las variables volumen de aceite y los hidrocarburos donde la probabilidad $p = 0,000 < \alpha = 0,05$, por lo que se rechaza la hipótesis nula. La correlación encontrada es estadísticamente significativa al nivel de significación del 5 %.

Cuadro 4.9: Correlación: volumen del aceite - hidrocarburos.

Correlaciones		Volumen del aceite	Hidrocarburos
Volumen del aceite	Correlación de Pearson	1	,707**
	Sig. (bilateral)		,000
	N	162	162
Hidrocarburos	Correlación de Pearson	,707**	1
	Sig. (bilateral)	,000	
	N	162	162

** . La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

Fuente: Software SPSS

La figura 4.4 muestra la tendencia al incremento de los hidrocarburos en partes por millón al aumentar el volumen de aceite lubricante removido de la superficie de la lámina metálica.

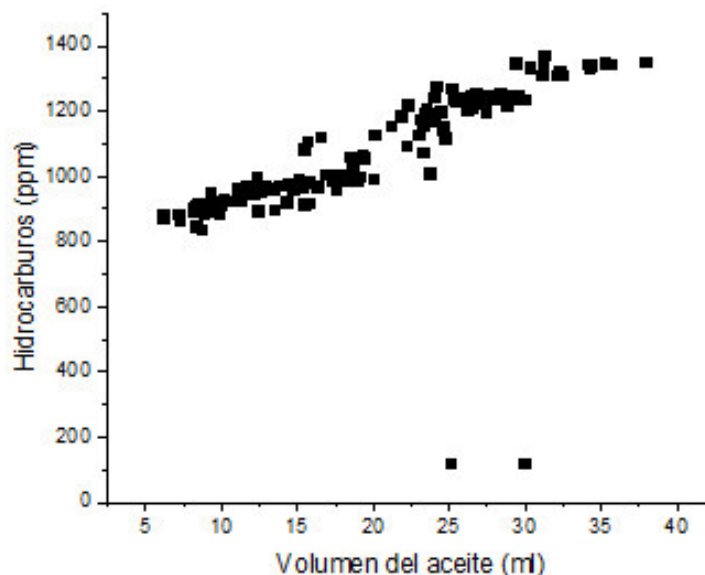


Figura 4.4: **Correlación de las variables: Volumen - Hidrocarburos.** Fuente: Software OriginPro

4.2. Influencia del ángulo de contacto obtenido en la limpieza de láminas metálicas con plasma frío a baja presión utilizadas para productos de línea blanca en el nivel de contaminación

4.2.1. Gases generados con diferentes ángulos de contacto

Los ángulos de contacto para la prueba experimental se seleccionaron de acuerdo a los determinados por la empresa como óptimos para el proceso posterior de recubrimiento con

pintura después de utilizar el sistema de limpieza superficial de láminas metálicas con baños de decapado, además que los ángulos de contacto utilizados idóneos son sustentados por diferentes productores de equipos generadores como Diener (2015) y Plasmatreat (2019) y autores como Rodriguez (2014) y Pallicer (2016) indican que un ángulo de contacto menor a 30° es óptimo para un recubrimiento posterior ya que la superficie se vuelve hidrofílica a cualquier líquido o sustancia.

El cuadro 4.10 presenta los valores de los ángulos de contacto utilizados. Se debe considerar que los ángulos de contacto pueden cambiar de acuerdo a las características y propiedades que necesite determinado producto.

Cuadro 4.10: Ángulos de contacto para análisis de gases.

Líquido de prueba	Ángulos teóricos	Estado del recubrimiento	Ángulos experimentales
Agua desionizada	Menores a 30°	Óptimo	16°
Agua desionizada	Entre 30° a 40°	Aceptable	36°
Agua desionizada	Superiores a 40°	Rechazado	53°

Adaptado de: Abbasian y colaboradores (2004); Diener (2015); Ma y colaboradores (1998); Zenkiewicz (2007)

La figura 4.9 presenta las variables analizadas en el proceso de limpieza superficial de láminas metálicas utilizadas para productos de línea blanca para determinar el nivel de contaminación de los gases generados por la descarga de plasma sobre un volumen controlado de aceite lubricante a diferente ángulo de contacto.

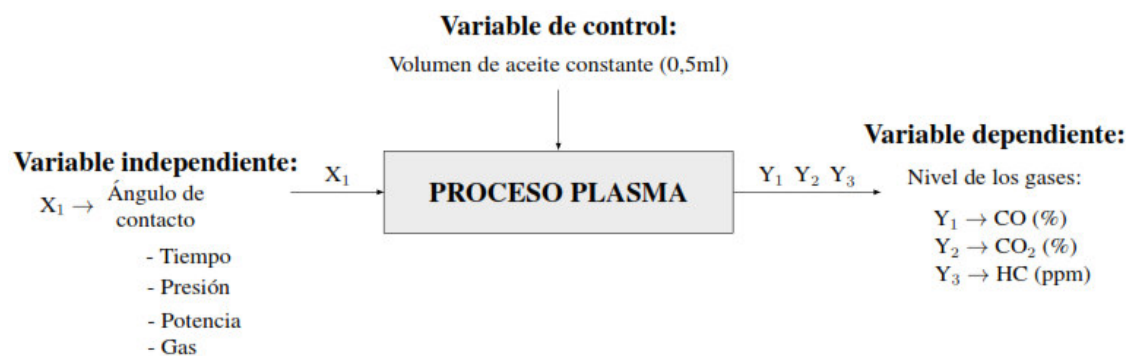


Figura 4.5: **Variables en la determinación del nivel de gases generados.** Fuente: Investigador

4.2.2. Nivel de contaminación de los gases generados a un ángulo de contacto de 16°

Los parámetros utilizados en el generador se presentan en la tabla 4.11 con un volumen de aceite de 0,5 ml para obtener un ángulo de 16° y los gases producidos de CO_2 , HC y CO, desprendidos de la limpieza superficial de las láminas metálicas utilizadas en productos de línea blanca. El cuadro 4.12 presenta los valores obtenidos de los ensayos realizados.

Cuadro 4.11: **Parámetros del generador para un ángulo de 16° .**

PARÁMETROS	
Tiempo	10 min
Presión	0,6 bar
Potencia	90 %
Gas	50/50

Fuente: Investigador

Cuadro 4.12: Nivel de los gases a un ángulo de 16°.

Nº de ensayo	Ángulo de contacto	CO (%)	CO2 (%)	HC (ppm)
1	16,1	0,62	0,2	2226
2	17,5	0,52	0,2	2279
3	16,6	0,61	0,2	2253
4	17,3	0,53	0,2	2122
5	16,8	0,45	0,2	2152
6	16,2	0,45	0,2	2202
7	16,0	0,53	0,2	2204
8	17,0	0,51	0,2	2287
9	17,1	0,47	0,2	2266
10	17,1	0,59	0,2	2130
11	16,0	0,53	0,2	2208
12	16,5	0,48	0,2	2295
13	16,2	0,60	0,2	2161
14	17,3	0,51	0,2	2243
15	16,3	0,61	0,2	2186
16	16,2	0,45	0,2	2298
17	17,5	0,50	0,2	2139
18	16,7	0,54	0,2	2228
19	17,4	0,47	0,2	2283
20	16,6	0,63	0,2	2182
21	16,6	0,59	0,2	2152
22	16,9	0,51	0,2	2156
23	16,9	0,48	0,2	2265
24	16,6	0,53	0,2	2236
25	16,1	0,56	0,2	2157
26	16,8	0,55	0,2	2136

Continuación: Cuadro 4.12

Nº de ensayo	Ángulo de contacto	CO (%)	CO2 (%)	HC (ppm)
27	17,00	0,51	0,2	2288
28	17,00	0,58	0,2	2212
29	16,40	0,60	0,2	2213
30	16,10	0,59	0,2	2183
31	16,52	0,63	0,2	2211
32	16,07	0,58	0,2	2194
33	16,48	0,62	0,2	2206
34	17,49	0,62	0,2	2270
35	17,01	0,52	0,2	2305
36	17,27	0,50	0,2	2169
37	16,09	0,57	0,2	2288
38	16,70	0,62	0,2	2283
39	17,48	0,47	0,2	2297
40	17,07	0,55	0,2	2193
41	17,28	0,50	0,2	2185
42	17,13	0,52	0,2	2161
43	16,72	0,58	0,2	2124
44	16,58	0,46	0,2	2240
45	17,27	0,50	0,2	2127
46	16,22	0,53	0,2	2251
47	16,43	0,47	0,2	2169
48	16,22	0,63	0,2	2197
49	16,40	0,48	0,2	2196
50	16,90	0,63	0,2	2319
51	16,12	0,56	0,2	2240
52	17,26	0,58	0,2	2308

Continuación: Cuadro 4.12

Nº de ensayo	Ángulo de contacto	CO (%)	CO2 (%)	HC (ppm)
53	17,12	0,55	0,2	2268
54	16,74	0,60	0,2	2129
55	17,10	0,61	0,2	2260
56	17,21	0,62	0,2	2310
57	17,27	0,63	0,2	2174
58	16,69	0,50	0,2	2303
59	17,05	0,45	0,2	2253
60	16,55	0,63	0,2	2251
61	17,48	0,52	0,2	2295
62	16,28	0,60	0,2	2226
63	16,57	0,62	0,2	2195
64	16,63	0,55	0,2	2308
65	16,94	0,46	0,2	2285
66	17,42	0,55	0,2	2269
67	17,08	0,47	0,2	2230
68	17,34	0,53	0,2	2195
69	17,04	0,56	0,2	2243
70	17,28	0,49	0,2	2303
71	16,21	0,60	0,2	2126
72	16,22	0,55	0,2	2213
73	17,15	0,56	0,2	2179
74	16,78	0,53	0,2	2178
75	16,14	0,57	0,2	2163
76	17,18	0,51	0,2	2148
77	16,05	0,62	0,2	2235
78	16,78	0,52	0,2	2161

Continuación: Cuadro 4.12

Nº de ensayo	Ángulo de contacto	CO (%)	CO2 (%)	HC (ppm)
79	16,65	0,51	0,2	2223
80	16,77	0,48	0,2	2187
81	17,11	0,50	0,2	2269
82	16,50	0,47	0,2	2294
83	16,48	0,62	0,2	2273
84	16,70	0,63	0,2	2212
85	16,02	0,55	0,2	2230
86	16,86	0,53	0,2	2217
87	17,40	0,62	0,2	2289
88	16,25	0,59	0,2	2241
89	16,90	0,50	0,2	2219
90	16,72	0,62	0,2	2161
91	16,40	0,61	0,2	2121
92	17,32	0,48	0,2	2210
93	17,47	0,58	0,2	2171
94	16,77	0,61	0,2	2201
95	16,34	0,52	0,2	2289
96	16,71	0,58	0,2	2176
97	16,56	0,45	0,2	2124
98	16,81	0,63	0,2	2301
99	16,12	0,62	0,2	2290
100	16,76	0,52	0,2	2134
101	16,48	0,57	0,2	2309
102	16,22	0,52	0,2	2151
103	17,49	0,54	0,2	2303
104	16,13	0,53	0,2	2161

Continuación: Cuadro 4.12

Nº de ensayo	Ángulo de contacto	CO (%)	CO2 (%)	HC (ppm)
105	16,11	0,49	0,2	2317
106	16,24	0,63	0,2	2183
107	16,15	0,49	0,2	2214
108	16,79	0,57	0,2	2132
109	17,09	0,55	0,2	2254
110	17,37	0,60	0,2	2252
111	16,34	0,59	0,2	2162
112	16,95	0,59	0,2	2231
113	16,24	0,59	0,2	2198
114	17,41	0,48	0,2	2167
115	16,18	0,47	0,2	2226
116	16,68	0,47	0,2	2198
117	16,96	0,61	0,2	2132
118	17,34	0,62	0,2	2260
119	17,46	0,45	0,2	2181
120	16,20	0,58	0,2	2241
121	16,35	0,61	0,2	2306
122	17,25	0,60	0,2	2234
123	16,87	0,56	0,2	2132
124	16,95	0,58	0,2	2235
125	16,21	0,61	0,2	2144
126	16,55	0,53	0,2	2297
127	16,76	0,51	0,2	2235
128	16,45	0,51	0,2	2191
129	17,35	0,53	0,2	2237
130	16,04	0,45	0,2	2254

Continuación: Cuadro 4.12

Nº de ensayo	Ángulo de contacto	CO (%)	CO2 (%)	HC (ppm)
131	16,29	0,56	0,2	2313
132	16,52	0,45	0,2	2190
133	16,54	0,51	0,2	2146
134	16,82	0,50	0,2	2121
135	16,41	0,49	0,2	2136
136	17,50	0,57	0,2	2312
137	16,10	0,49	0,2	2183
138	16,38	0,46	0,2	2248
139	16,08	0,50	0,2	2134
140	16,08	0,61	0,2	2276
141	16,94	0,60	0,2	2270
142	16,71	0,57	0,2	2296
143	16,40	0,52	0,2	2214
144	16,64	0,62	0,2	2311
145	17,31	0,53	0,2	2287
146	17,47	0,60	0,2	2153
147	17,32	0,59	0,2	2157
148	16,59	0,57	0,2	2290
149	17,19	0,46	0,2	2236
150	16,26	0,47	0,2	2210
151	16,39	0,49	0,2	2174
152	16,98	0,57	0,2	2187
153	16,59	0,56	0,2	2166
154	16,89	0,63	0,2	2167
155	16,74	0,58	0,2	2141
156	16,23	0,48	0,2	2235

Continuación: Cuadro 4.12

Nº de ensayo	Ángulo de contacto	CO (%)	CO2 (%)	HC (ppm)
157	16,56	0,58	0,2	2147
158	16,04	0,48	0,2	2257
159	16,27	0,48	0,2	2246
160	17,36	0,52	0,2	2275
161	17,23	0,50	0,2	2303
162	16,36	0,57	0,2	2224

Fuente: Investigador

4.2.3. Nivel de contaminación de los gases generados a un ángulo de contacto de 36°

Los parámetros del generador de plasma frío a baja presión se presentan en la tabla 4.13 con un volumen de aceite constante de 0,5 ml para obtener un ángulo de 36° y los gases desprendidos de la limpieza superficial de las láminas metálicas como el CO₂, HC y CO. El cuadro 4.14 presenta los valores obtenidos en los ensayos realizados.

Cuadro 4.13: Parámetros del generador para un ángulo de 36°.

PARÁMETROS	
Tiempo	6 min
Presión	0,6 bar
Potencia	70 %
Gas	50/50

Fuente: Investigador

Cuadro 4.14: Nivel de los gases a un ángulo de 36°.

Nº de ensayo	Ángulo de contacto	CO (%)	CO2 (%)	HC (ppm)
1	37,2	0,36	0,1	1095
2	36,8	0,37	0,1	1086
3	37,3	0,38	0,1	1094
4	36,6	0,39	0,1	1123
5	37,1	0,41	0,1	1140
6	36,5	0,42	0,1	1110
7	36,6	0,42	0,1	1090
8	37,0	0,40	0,1	1112
9	37,5	0,33	0,1	1138
10	36,4	0,36	0,1	1101
11	36,8	0,35	0,1	1139
12	36,8	0,42	0,1	1083
13	37,0	0,43	0,1	1102
14	37,2	0,35	0,1	1113
15	36,5	0,39	0,1	1103
16	36,6	0,37	0,1	1084
17	36,6	0,38	0,1	1135
18	36,7	0,42	0,1	1140
19	37,1	0,36	0,1	1114
20	37,0	0,41	0,1	1136
21	36,9	0,43	0,1	1085
22	37,4	0,39	0,1	1137
23	36,6	0,38	0,1	1141
24	37,5	0,39	0,1	1104
25	36,5	0,42	0,1	1138
26	36,6	0,33	0,1	1093

Continuación: Cuadro 4.14

Nº de ensayo	Ángulo de contacto	CO (%)	CO2 (%)	HC (ppm)
27	37,00	0,35	0,1	1142
28	37,50	0,37	0,1	1086
29	36,40	0,40	0,1	1115
30	36,80	0,39	0,1	1105
31	37,46	0,42	0,1	1139
32	36,84	0,41	0,1	1143
33	36,26	0,37	0,1	1087
34	37,50	0,38	0,1	1106
35	36,58	0,35	0,1	1116
36	36,47	0,39	0,1	1140
37	36,60	0,37	0,1	1144
38	37,12	0,41	0,1	1094
39	36,53	0,39	0,1	1141
40	36,80	0,33	0,1	1145
41	36,30	0,34	0,1	1095
42	37,35	0,36	0,1	1107
43	36,75	0,41	0,1	1090
44	37,20	0,36	0,1	1117
45	36,80	0,37	0,1	1142
46	37,30	0,38	0,1	1146
47	36,60	0,36	0,1	1096
48	37,10	0,35	0,1	1108
49	36,45	0,38	0,1	1145
50	36,55	0,36	0,1	1147
51	36,95	0,37	0,1	1097
52	37,45	0,38	0,1	1118

Continuación: Cuadro 4.14

Nº de ensayo	Ángulo de contacto	CO (%)	CO2 (%)	HC (ppm)
53	36,36	0,39	0,1	1092
54	36,78	0,41	0,1	1109
55	36,75	0,42	0,1	1098
56	36,99	0,42	0,1	1146
57	37,15	0,40	0,1	1119
58	36,45	0,33	0,1	1148
59	36,55	0,36	0,1	1112
60	36,58	0,35	0,1	1147
61	36,66	0,42	0,1	1094
62	37,13	0,43	0,1	1113
63	37,01	0,35	0,1	1149
64	36,90	0,39	0,1	1120
65	37,40	0,37	0,1	1095
66	36,60	0,38	0,1	1148
67	37,50	0,42	0,1	1081
68	36,45	0,39	0,1	1099
69	36,55	0,37	0,1	1096
70	36,95	0,38	0,1	1121
71	37,45	0,42	0,1	1115
72	36,36	0,36	0,1	1149
73	36,78	0,41	0,1	1082
74	37,46	0,43	0,1	1122
75	36,84	0,39	0,1	1097
76	36,26	0,38	0,1	1114
77	36,90	0,39	0,1	1150
78	37,05	0,42	0,1	1123

Continuación: Cuadro 4.14

Nº de ensayo	Ángulo de contacto	CO (%)	CO2 (%)	HC (ppm)
79	36,30	0,33	0,1	1091
80	37,35	0,35	0,1	1083
81	36,75	0,37	0,1	1098
82	37,20	0,40	0,1	1116
83	36,80	0,39	0,1	1124
84	37,30	0,42	0,1	1081
85	36,60	0,41	0,1	1117
86	37,10	0,38	0,1	1099
87	36,20	0,35	0,1	1083
88	37,30	0,39	0,1	1092
89	36,90	0,37	0,1	1125
90	37,05	0,41	0,1	1118
91	36,30	0,39	0,1	1085
92	37,35	0,33	0,1	1082
93	36,75	0,34	0,1	1132
94	37,20	0,36	0,1	1086
95	36,80	0,41	0,1	1101
96	37,30	0,36	0,1	1126
97	36,60	0,37	0,1	1119
98	37,10	0,38	0,1	1083
99	36,45	0,36	0,1	1133
100	36,55	0,35	0,1	1102
101	36,95	0,38	0,1	1120
102	37,45	0,36	0,1	1087
103	36,36	0,37	0,1	1127
104	36,78	0,41	0,1	1084

Continuación: Cuadro 4.14

Nº de ensayo	Ángulo de contacto	CO (%)	CO2 (%)	HC (ppm)
105	36,75	0,42	0,1	1121
106	36,99	0,42	0,1	1088
107	37,15	0,40	0,1	1134
108	36,45	0,33	0,1	1089
109	36,55	0,36	0,1	1128
110	36,58	0,35	0,1	1103
111	36,66	0,42	0,1	1122
112	37,13	0,43	0,1	1085
113	37,01	0,35	0,1	1135
114	36,90	0,39	0,1	1090
115	37,40	0,37	0,1	1104
116	36,60	0,38	0,1	1123
117	37,50	0,42	0,1	1129
118	36,45	0,36	0,1	1136
119	36,55	0,41	0,1	1091
120	36,95	0,43	0,1	1124
121	37,45	0,38	0,1	1130
122	36,36	0,35	0,1	1086
123	36,78	0,39	0,1	1092
124	37,46	0,37	0,1	1125
125	36,84	0,41	0,1	1137
126	36,26	0,39	0,1	1093
127	37,50	0,33	0,1	1086
128	36,58	0,34	0,1	1126
129	36,47	0,36	0,1	1131
130	36,60	0,41	0,1	1087

Continuación: Cuadro 4.14

Nº de ensayo	Ángulo de contacto	CO (%)	CO2 (%)	HC (ppm)
131	37,12	0,36	0,1	1128
132	36,53	0,37	0,1	1094
133	36,80	0,38	0,1	1132
134	36,30	0,36	0,1	1136
135	37,35	0,35	0,1	1106
136	36,75	0,38	0,1	1129
137	36,99	0,36	0,1	1088
138	37,15	0,37	0,1	1137
139	36,45	0,42	0,1	1133
140	36,55	0,33	0,1	1107
141	36,58	0,35	0,1	1095
142	36,84	0,37	0,1	1089
143	36,60	0,40	0,1	1130
144	37,10	0,39	0,1	1134
145	36,20	0,42	0,1	1138
146	37,30	0,41	0,1	1096
147	36,90	0,38	0,1	1090
148	37,05	0,35	0,1	1108
149	36,30	0,39	0,1	1131
150	37,35	0,37	0,1	1097
151	36,75	0,41	0,1	1135
152	36,99	0,39	0,1	1091
153	37,15	0,33	0,1	1109
154	36,45	0,34	0,1	1132
155	36,55	0,36	0,1	1098
156	36,58	0,39	0,1	1139

Continuación: Cuadro 4.14

Nº de ensayo	Ángulo de contacto	CO (%)	CO2 (%)	HC (ppm)
157	36,84	0,37	0,1	1136
158	36,26	0,38	0,1	1110
159	37,50	0,42	0,1	1092
160	36,58	0,36	0,1	1099
161	36,47	0,41	0,1	1133
162	36,60	0,43	0,1	1137

Fuente: Investigador

4.2.4. Nivel de contaminación de los gases generados a un ángulo de contacto de 53°

Los parámetros del generador se presentan en la tabla 4.15 con un volumen de aceite constante de 0,5 ml para obtener un ángulo de 53° con los gases generados por la limpieza superficial como el CO₂, HC y CO. El cuadro 4.16 presenta los valores obtenidos de los ensayos realizados.

Cuadro 4.15: Parámetros del generador para un ángulo de 53°.

PARÁMETROS	
Tiempo	4 min
Presión	0,6 bar
Potencia	60 %
Gas	50/50

Fuente: Investigador

Cuadro 4.16: Nivel de los gases a un ángulo de 53°.

Nº de ensayo	Ángulo de contacto	CO (%)	CO2 (%)	HC (ppm)
1	53,8	0,28	0,1	1007
2	53,2	0,34	0,1	1014
3	54,0	0,34	0,1	1019
4	53,6	0,28	0,1	997
5	53,9	0,31	0,1	1008
6	53,9	0,27	0,1	1024
7	53,5	0,35	0,1	1015
8	53,4	0,26	0,1	1020
9	53,1	0,35	0,1	1009
10	53,5	0,26	0,1	998
11	53,7	0,35	0,1	996
12	54,0	0,29	0,1	1016
13	53,6	0,32	0,1	1021
14	53,3	0,28	0,1	1025
15	53,3	0,26	0,1	1010
16	53,1	0,27	0,1	1000
17	53,5	0,26	0,1	997
18	54,0	0,30	0,1	1022
19	53,4	0,27	0,1	1026
20	53,6	0,27	0,1	1017
21	53,9	0,28	0,1	1011
22	53,5	0,33	0,1	1001
23	53,1	0,25	0,1	1023
24	53,4	0,28	0,1	1018
25	53,4	0,27	0,1	1012
26	53,6	0,31	0,1	998

Continuación: Cuadro 4.16

Nº de ensayo	Ángulo de contacto	CO (%)	CO2 (%)	HC (ppm)
27	53,40	0,29	0,1	1027
28	53,20	0,29	0,1	1002
29	53,90	0,29	0,1	1024
30	53,40	0,29	0,1	1019
31	53,61	0,30	0,1	1013
32	53,65	0,29	0,1	999
33	53,43	0,32	0,1	1028
34	53,81	0,34	0,1	1025
35	53,16	0,29	0,1	1003
36	53,44	0,30	0,1	1020
37	53,62	0,30	0,1	1001
38	53,89	0,33	0,1	1014
39	53,82	0,31	0,1	1029
40	53,66	0,30	0,1	1026
41	53,17	0,35	0,1	1004
42	53,45	0,31	0,1	1021
43	53,44	0,34	0,1	1015
44	53,63	0,31	0,1	1002
45	53,90	0,31	0,1	1027
46	53,18	0,32	0,1	1030
47	53,67	0,32	0,1	1005
48	53,46	0,30	0,1	1016
49	53,83	0,32	0,1	1003
50	53,64	0,32	0,1	1028
51	53,45	0,35	0,1	1031
52	53,91	0,35	0,1	1022

Continuación: Cuadro 4.16

Nº de ensayo	Ángulo de contacto	CO (%)	CO2 (%)	HC (ppm)
53	53,19	0,26	0,1	1006
54	53,68	0,33	0,1	1029
55	53,47	0,33	0,1	996
56	53,64	0,33	0,1	1017
57	53,46	0,31	0,1	1023
58	53,92	0,34	0,1	1004
59	53,20	0,35	0,1	1030
60	53,84	0,26	0,1	1007
61	53,65	0,26	0,1	997
62	53,48	0,27	0,1	1024
63	53,21	0,35	0,1	1005
64	53,93	0,27	0,1	1031
65	53,69	0,26	0,1	998
66	53,47	0,34	0,1	1018
67	53,85	0,26	0,1	1025
68	53,66	0,28	0,1	1006
69	53,47	0,27	0,1	996
70	53,94	0,27	0,1	1008
71	53,70	0,29	0,1	999
72	53,22	0,28	0,1	997
73	53,86	0,32	0,1	1007
74	53,49	0,27	0,1	1026
75	53,67	0,28	0,1	1019
76	53,48	0,28	0,1	1000
77	53,95	0,28	0,1	1027
78	53,71	0,29	0,1	998

Continuación: Cuadro 4.16

Nº de ensayo	Ángulo de contacto	CO (%)	CO2 (%)	HC (ppm)
79	53,23	0,30	0,1	1008
80	53,87	0,28	0,1	1028
81	53,68	0,30	0,1	1001
82	53,24	0,35	0,1	1009
83	53,49	0,29	0,1	999
84	53,72	0,29	0,1	1029
85	53,96	0,31	0,1	1002
86	53,50	0,29	0,1	1020
87	53,69	0,31	0,1	1010
88	53,50	0,33	0,1	1009
89	53,25	0,30	0,1	1000
90	53,88	0,32	0,1	1003
91	53,73	0,30	0,1	1030
92	53,97	0,31	0,1	1010
93	53,51	0,32	0,1	1021
94	53,26	0,26	0,1	1001
95	53,98	0,33	0,1	1004
96	53,51	0,31	0,1	1031
97	53,70	0,32	0,1	1011
98	53,52	0,33	0,1	1022
99	53,99	0,30	0,1	1002
100	53,74	0,32	0,1	1005
101	53,27	0,34	0,1	996
102	54,00	0,34	0,1	1011
103	53,52	0,33	0,1	1012
104	53,52	0,34	0,1	1003

Continuación: Cuadro 4.16

Nº de ensayo	Ángulo de contacto	CO (%)	CO2 (%)	HC (ppm)
105	53,28	0,27	0,1	997
106	53,75	0,35	0,1	1006
107	53,53	0,33	0,1	1023
108	53,89	0,35	0,1	1013
109	53,05	0,34	0,1	1025
110	53,71	0,35	0,1	1007
111	53,53	0,31	0,1	1012
112	53,29	0,26	0,1	1004
113	53,76	0,35	0,1	998
114	53,54	0,26	0,1	1024
115	53,72	0,28	0,1	1015
116	53,06	0,26	0,1	1013
117	53,77	0,27	0,1	1008
118	53,55	0,32	0,1	999
119	53,54	0,27	0,1	1005
120	53,30	0,26	0,1	1025
121	53,90	0,28	0,1	1014
122	53,55	0,27	0,1	1009
123	53,78	0,28	0,1	1000
124	53,56	0,33	0,1	1026
125	53,07	0,29	0,1	1010
126	53,31	0,27	0,1	1015
127	53,77	0,29	0,1	1001
128	53,57	0,29	0,1	1011
129	53,79	0,28	0,1	1016
130	53,32	0,30	0,1	1016

Continuación: Cuadro 4.16

Nº de ensayo	Ángulo de contacto	CO (%)	CO2 (%)	HC (ppm)
131	53,08	0,28	0,1	1027
132	53,78	0,26	0,1	1012
133	53,56	0,31	0,1	1006
134	53,58	0,34	0,1	1017
135	53,80	0,30	0,1	1002
136	53,34	0,29	0,1	1028
137	53,91	0,29	0,1	1018
138	53,09	0,32	0,1	1029
139	53,35	0,27	0,1	1007
140	53,10	0,31	0,1	1003
141	53,79	0,30	0,1	1030
142	53,57	0,33	0,1	1019
143	53,59	0,30	0,1	1008
144	53,36	0,28	0,1	1014
145	53,80	0,30	0,1	1004
146	53,81	0,34	0,1	1020
147	53,92	0,29	0,1	1009
148	53,82	0,31	0,1	1015
149	53,60	0,32	0,1	1031
150	53,37	0,35	0,1	1010
151	53,58	0,31	0,1	1005
152	53,11	0,35	0,1	1016
153	53,83	0,33	0,1	1021
154	53,59	0,32	0,1	996
155	53,61	0,26	0,1	1011
156	53,38	0,30	0,1	1017

Continuación: Cuadro 4.16

Nº de ensayo	Ángulo de contacto	CO (%)	CO2 (%)	HC (ppm)
157	53,84	0,32	0,1	1006
158	53,12	0,33	0,1	1022
159	53,62	0,34	0,1	1012
160	53,60	0,27	0,1	1018
161	53,13	0,26	0,1	1023
162	53,85	0,33	0,1	1013

Fuente: Investigador

Determinado los valores se realizó un análisis de dispersión de los datos para el monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), los hidrocarburos (HC) y el ángulo de contacto. El cuadro 4.17 presenta los valores obtenidos de la desviación estándar.

Cuadro 4.17: **Dispersión de los datos obtenidos.**

Desviación estandar $s = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n-1}}$			
Descripción	∠ 16°	∠ 36°	∠ 53°
Ángulo de contacto	0,4472	0,3633	0,2564
Monóxido de carbono CO	0,0554	0,0278	0,0286
Dióxido de carbono CO ₂	—	—	—
Hidrocarburos HC	57,4158	20,8437	10,3192

Fuente: Investigador

Los valores de los ángulos de contacto obtenidos en el goniómetro óptico no presentan una dispersión considerable y de igual manera el monóxido de carbono CO en cada ángulo de contacto analizado, de igual manera se observó que el dióxido de carbono CO₂ no

presenta dispersión en ninguno de los ángulos. Los Hidrocarburos HC presentan una dispersión considerable en cada grupo analizado donde se observa que a menor valor del ángulo de contacto presenta una mayor dispersión de los datos.

4.2.5. Pruebas de hipótesis 2

Determinados los gases y definido la dispersión de los datos obtenidos se procedió analizar su nivel de contaminación en porcentaje y partes por millón en cada uno de los ángulos de contacto o nivel de limpieza.

Hipótesis específica 2

El ángulo de contacto obtenido en la limpieza de láminas metálicas con plasma frío a baja presión y utilizadas en productos de línea blanca influye directamente en el nivel de contaminación.

Hipótesis estadísticas

H_0 : No existe diferencia entre los grupos de gases comparados (CO, CO₂ y HC)

H_1 : Existe diferencia entre los grupos de gases comparados (CO, CO₂ y HC)

Nivel de significación

El nivel de significación elegido es: $\alpha = 0.05$ (5 %)

Modelo estadístico

El modelo estadístico que se utilizó es la prueba de Friedman para más de dos muestras dependientes que indica si existe o no una diferencia entre los grupos de los gases generados a diferentes ángulos de contacto.

4.2.6. Presentación de resultados y toma de decisión

Para el cálculo, se utilizó el software estadístico SPSS para determinar si existe diferencia entre los niveles generados del mismo gas bajo tres condiciones diferentes de grado de limpieza o ángulos de contacto, presentando los siguientes resultados:

• Monóxido de Carbono (CO):

El cuadro 4.18 presenta un resumen de los datos utilizados para el contraste de hipótesis y el anexo E presenta el total de los datos analizados.

Cuadro 4.18: **datos del monóxido de carbono a diferentes ángulos.**

Monóxido de carbono (% CO)			
Ensayo	∠ 16°	∠ 36°	∠ 53°
1	0,62	0,36	0,28
2	0,52	0,37	0,34
3	0,61	0,38	0,34
4	0,53	0,39	0,28
.
.
.
162	0,57	0,43	0,33

Fuente: Investigador

Cuadro 4.19: Rangos y estadísticos de prueba CO.

Prueba de Friedman

Rangos	
	Rango promedio
COa16	3,00
COa36	1,96
COa53	1,04

Estadísticos de contraste ^a	
N	162
Chi-cuadrado	313,944
gl	2
Sig. asintót.	,000

a. Prueba de Friedman

Fuente: Software SPSS

El cuadro 4.19 muestra los rangos medios de cada variable, y que la prueba es bilateral con el nivel de significación al 5 %, presentando dos grados de libertad y verificado con la siguiente expresión:

$$Gl = K - 1 = 3 - 1 = 2$$

Donde K es el número de variables analizadas.

Utilizando la tabla de la chi-cuadrada, en este caso para 2 grados de libertad al nivel del 5 % de significación, se tiene:

$$\chi^2_{crit.} = 5,99$$

Del cuadro de rangos y estadísticos de prueba de Friedman, el valor de $p = 0,000$.

Decisión:

El valor de $\chi_F^2 > \chi_{crit.}^2$ ($313,944 > 5,99$), entonces se rechaza la hipótesis nula. La probabilidad de $p < \alpha$: es decir el $p = 0,000$ es menor que $\alpha = 0,05$ por lo que se rechaza H_0 .

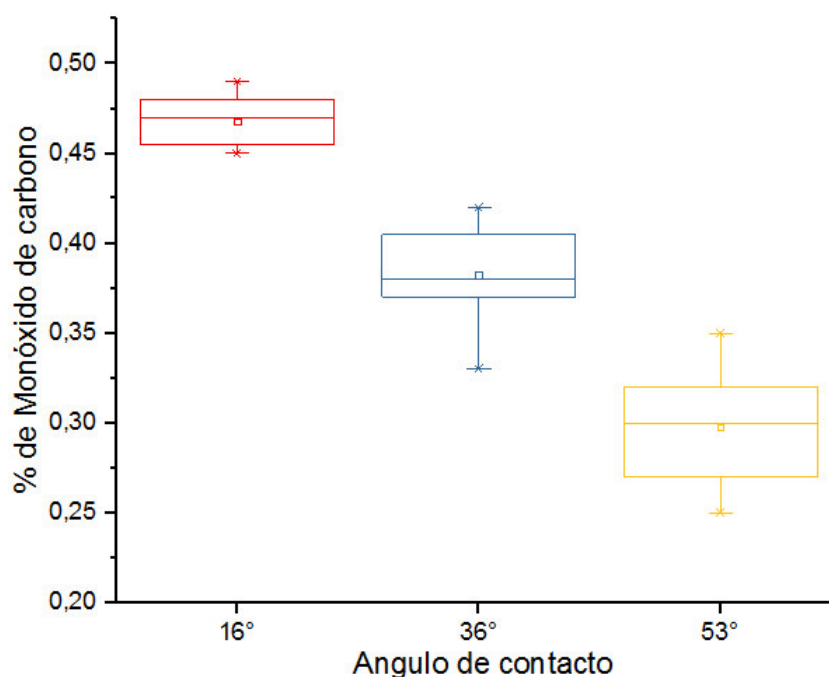


Figura 4.6: **Análisis de cajas CO.** Fuente: Software OriginPro

En la figura 4.6 se observa la diferencia de los diagramas de cajas para cada ángulo con respecto al porcentaje de monóxido de carbono. En cada diagrama de caja que representa a cada grupo de datos con diferente ángulo de contacto se observa el máximo y mínimo valor del porcentaje de monóxido de carbono y una simetría en cada grupo de datos con respecto al valor central.

- **Dióxido de Carbono (CO₂):**

El cuadro 4.20 presenta un resumen de los datos utilizados para el contraste de hipótesis y el anexo D el total de los datos analizados.

Cuadro 4.20: Datos del dióxido de carbono a diferentes ángulos.

Dióxido de carbono (% CO ₂)			
Ensayo	∠ 16°	∠ 36°	∠ 53°
1	0,2	0,1	0,1
2	0,2	0,1	0,1
3	0,2	0,1	0,1
4	0,2	0,1	0,1
.
.
.
162	0,2	0,1	0,1

Fuente: Investigador

Cuadro 4.21: Rangos y estadísticos de prueba CO₂.**Prueba de Friedman**

Rangos	
	Rango promedio
CO2a16	3,00
CO2a36	1,50
CO2a53	1,50

Estadísticos de contraste ^a	
N	162
Chi-cuadrado	324,000
gl	2
Sig. asintót.	,000

a. Prueba de Friedman

Fuente: Software SPSS

El cuadro 4.21 muestra los rangos medios de cada variable, como la prueba es bilateral y con el nivel de significación al 5 % los grados de libertad son:

$$Gl = K - 1 = 3 - 1 = 2$$

Utilizando la tabla de la chi-cuadrada, en este caso para 2 grados de libertad al nivel del 5 % se tiene:

$$\chi_{crit.}^2 = 5,99$$

Del cuadro de rangos y estadísticos de prueba de Friedman, el valor de $p = 0,000$.

Decisión:

El valor de $\chi_F^2 > \chi_{crit.}^2$ ($324 > 5,99$), entonces se rechaza la hipótesis nula. La probabilidad de $p < \alpha$: es decir el $p = 0,000$ es menor que $\alpha = 0,05$, por lo que se rechaza H_0 .

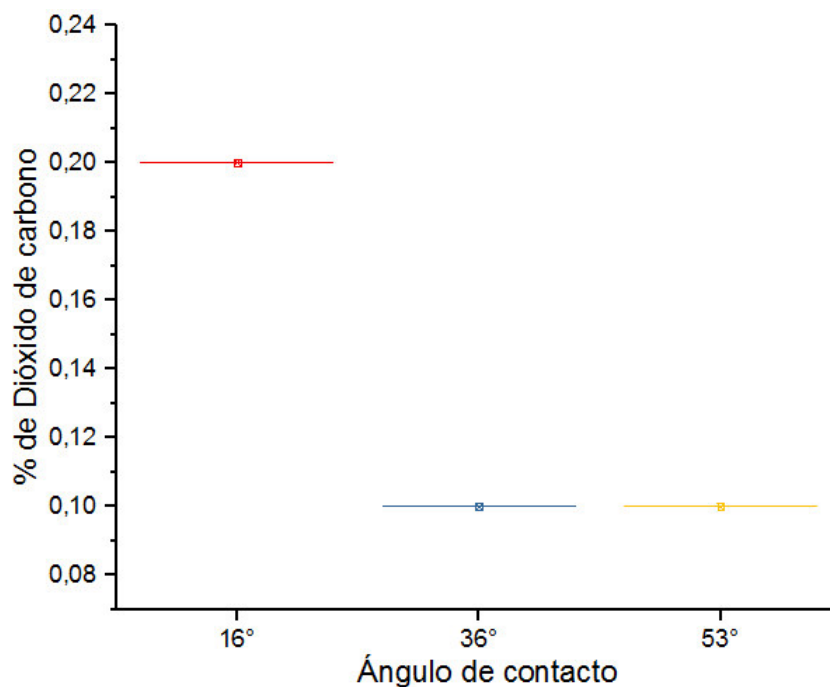


Figura 4.7: **Análisis de cajas CO₂**. Fuente: Software OriginPro

En la figura 4.7 se observa que el porcentaje de dióxido de carbono es el mismo para los ángulos de 36 y 53 grados y presentan una diferencia con el ángulo de 16 grados considerando que esta condición se da para la composición química del aceite lubricante analizado. Para cada grupo de datos a diferente ángulo el valor del dióxido de carbono permanece constante.

• **Hidrocarburos (HC):**

El cuadro 4.22 presenta un resumen de los datos utilizados para el contraste de hipótesis y el anexo F el total de los datos analizados.

Cuadro 4.22: **Datos de hidrocarburos a diferentes ángulos.**

Hidrocarburos (ppm HC)			
Ensayo	∠ 16°	∠ 36°	∠ 53°
1	2226	1095	1007
2	2279	1086	1014
3	2253	1094	1019
4	2122	1123	997
.
.
.
162	2224	1137	1013

Fuente: Investigador

Cuadro 4.23: Rangos y estadísticos de prueba HC.

Prueba de Friedman

Rangos	
	Rango promedio
HCa16	3,00
HCa36	2,00
HCa53	1,00

Estadísticos de contraste^a

N	162
Chi-cuadrado	324,000
gl	2
Sig. asintót.	,000

a. Prueba de Friedman

Fuente: Software SPSS

El cuadro 4.23 muestra los rangos medios de cada variable, como la prueba es bilateral y con el nivel de significación al 5 % los grados de libertad son:

$$Gl = K - 1 = 3 - 1 = 2$$

Utilizando la tabla de la chi-cuadrada, en este caso para 2 grados de libertad al nivel del 5 % se tiene:

$$\chi_{crit.}^2 = 5,99$$

Del cuadro de rangos y estadísticos de prueba de Friedman, el valor de $p = 0,000$.

Decisión:

El valor de $\chi_F^2 > \chi_{crit.}^2$ ($324 > 5,99$), entonces se rechaza la hipótesis nula. La probabilidad de $p < \alpha$: es decir el $p = 0,000$ es menor que $\alpha = 0,05$, por lo que se rechaza H_0 .

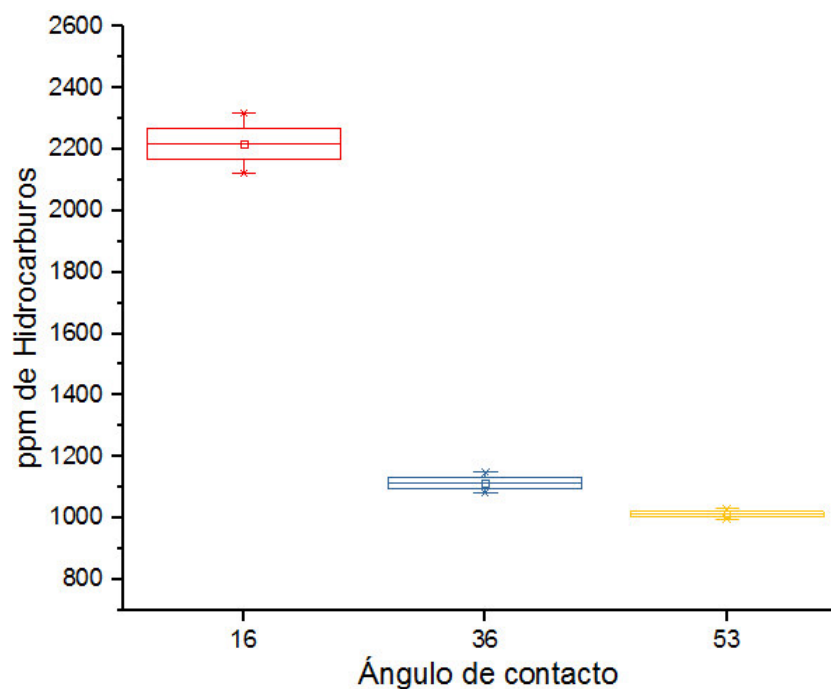


Figura 4.8: **Análisis de cajas HC.** Fuente: Software OriginPro

En la figura 4.8 se observa la diferencia de los diagramas de cajas para cada ángulo con respecto a las partes por millón de los hidrocarburos.

4.3. Incidencia del volumen de aceite y el ángulo de contacto en el nivel de contaminación generado por el plasma frío a baja presión en la limpieza de láminas metálicas utilizadas para productos de línea blanca

Para determinar la incidencia del volumen de aceite y el ángulo de contacto se establecieron 27 muestras, en 3 grupos de acuerdo al volumen de aceite y con 3 diferentes ángulos de contacto.

Hipótesis específica 3

El efecto del volumen de aceite y el ángulo de contacto inciden directamente en el nivel de contaminación generado por el plasma frío a baja presión en la limpieza de láminas metálicas para productos de línea blanca.

Hipótesis estadísticas

El efecto del volumen de aceite y el ángulo de contacto no inciden en el

H_0 : nivel de contaminación generado por el plasma frío a baja presión.

$$\beta_0 = 0, \beta_1 = 0, \beta_2 = 0$$

El efecto del volumen de aceite y el ángulo de contacto inciden directa-

H_1 : mente en el nivel de contaminación generado por el plasma frío a baja presión.

$$\beta_0 \neq 0, \beta_1 \neq 0, \beta_2 \neq 0$$

Nivel de significación

El nivel de significación elegido es: $\alpha = 0.05$ (5 %)

Modelo estadístico

El modelo estadístico utilizado fue un análisis de regresión lineal múltiple que permitió establecer la relación que se produce entre la variable dependiente y las variables independientes.



Figura 4.9: **Incidencia de las variables en el nivel de contaminación.** Fuente: Investigador

La notación matemática del modelo o ecuación de regresión lineal múltiple está definida por la ecuación:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + e$$

donde:

Y Nivel de contaminación

β_0 constante

β_1 coeficiente de la primera variable independiente (volumen de aceite)

β_2 coeficiente de la segunda variable independiente (ángulo de contacto)

e constante

x₁ variable independiente: volumen de aceite

x₂ variable independiente: ángulo de contacto

4.3.1. Presentación de resultados y toma de decisión

Para el cálculo, se utilizó el software estadístico SPSS para determinar si existe interacción de las variables independientes sobre la variable dependiente, se tomaron 9 muestras para cada gas contaminante (CO, CO₂, y HC), considerando 3 diferentes volúmenes de aceite sobre la superficie de las láminas metálicas (0,1 ml, 0,5ml, 1 ml) y con diferentes ángulos de contacto (16°, 36°, 53°), presentando los siguientes resultados:

• **Monóxido de Carbono (CO)**

Las mediciones de los porcentajes de CO, producidos por el proceso de limpieza con plasma frío a presión se presentan en la tabla 4.24:

Cuadro 4.24: Datos de monóxido de carbono a diferentes ángulos y volúmenes.

		%CO		
		Volumen		
Ángulo		0.1 ml	0.5 ml	1 ml
	∠ 16°	0,58	0,62	0,47
	∠ 36°	0,36	0,36	0,41
	∠ 53°	0,31	0,28	0,33

Fuente: Investigador

Análisis de los datos con SPSS:

Cuadro 4.25: Resumen del modelo CO.

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación
1	,915 ^a	,837	,783	,05586

a. Variables predictoras: (Constante), Angulo, Volumen

b. Variable dependiente: CO

Estadísticos de cambio					Durbin-Watson
Cambio en R cuadrado	Cambio en F	gl1	gl2	Sig. Cambio en F	
,837	15,396	2	6	,004	1,592

Fuente: Software SPSS

La bondad de ajuste, es decir, la medida en que el modelo es capaz de explicar o reproducir los valores de la variable dependiente a partir de los valores de las variables independientes pueden evaluarse tanto por el cuadro de resumen del modelo 1 como en el cuadro Anova. En el cuadro resumen del modelo 1, el coeficiente R refleja el grado de correlación existente entre el nivel de contaminación de CO y las variables independientes tomadas en conjunto, que en nuestro estudio corresponden al Volumen de aceite y el ángulo de contacto. En este caso, $R = 0,915$ que indica que existe una correlación múltiple alta entre las variables que conforman el modelo lineal.

El coeficiente de determinación (R^2) es de 0,837, lo que significa que el 83,7 % de las variaciones del nivel de CO pueden ser explicados por los cambios del volumen de aceite y el ángulo de contacto. El restante 16,3 % (coeficiente de alienación) del comportamiento del nivel de CO se debería a otros factores no incluidos en el modelo multivariante elaborado.

El R^2 ajustado nos indica un valor del 78,3 % de las variaciones del nivel de CO explicados por las variables independientes, debido al efecto del tamaño del modelo (cantidad de datos predictores). Finalmente, el error estándar de la estimación es de 0,05586 que nos indica la desviación media de los pronósticos generados por el modelo de regresión con los valores reales del nivel de contaminación del CO.

El valor del coeficiente de Durbin Watson corresponde a 1,592 que se encuentra entre los valores 0,629 y 1,699, lo que indica que existe independencia de errores entre las variables (no hay autocorrelación) y el modelo se encuentra correctamente planteado.

Cuadro 4.26: Análisis Anova CO.

ANOVA^a

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	,096	2	,048	15,396	,004 ^b
	Residual	,019	6	,003		
	Total	,115	8			

a. Variable dependiente: CO

b. Variables predictoras: (Constante), Angulo, Volumen

Fuente: Software SPSS

Decisión:

De acuerdo con el valor-p (Sig.) = 0,004 < α = 0,05, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la alternativa, donde la interacción del volumen de aceite y el ángulo de contacto inciden directamente en el nivel de contaminación de CO generado por el plasma frío a baja presión.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + e$$

$$Y = \beta_0 + \beta_1 (\text{ángulo de contacto}) + \beta_2 (\text{volumen de aceite}) + \text{error tip. de la estimación}$$

$$\%CO = 0,660 - 0,007 (\text{ángulo de contacto}) - 0,016 (\text{volumen de aceite}) + 0,05586$$

Cuadro 4.27: Análisis de coeficientes CO.

Coeficientes ^a					
Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes tipificados	t	Sig.
	B	Error típ.	Beta		
1 (Constante)	,660	,054		12,198	,000
Volumen	-,016	,051	-,051	-,308	,769
Angulo	-,007	,001	-,913	-5,541	,001

a. Variable dependiente: CO

Correlaciones			Estadísticos de colinealidad	
Orden cero	Parcial	Semiparcial	Tolerancia	FIV
-,051	-,125	-,051	1,000	1,000
-,913	-,915	-,913	1,000	1,000

Fuente: Software SPSS

Como se observa en el cuadro 4.27 el valor de la varianza inflada VIF es 1 para el volumen de aceite y el ángulo de contacto, lo que indica que no existe multicolinealidad, es decir, correlación entre las variables independientes, lo que permite validar el modelo. En el análisis de correlaciones, en las de orden cero se observa una correlación baja del -0,051 entre el volumen de aceite y el nivel de CO, y una correlación alta del -0,913 entre el ángulo y el nivel de CO, el signo negativo indica una relación inversa, es decir, mientras la una variable disminuye la otra aumenta. Se observa que existe también una fuerte asociación entre el ángulo de contacto y el nivel de contaminación del -0,915 sin considerar el efecto del volumen de aceite y por otra parte una baja asociación entre el volumen y el nivel de contaminación del 0,125 sin considerar el efecto del ángulo de contacto. Los resultados de las correlaciones semiparciales muestran una fuerte relación entre el ángulo de contacto y el nivel de CO con un valor de -0,913 considerando el efecto del volumen de aceite sobre el ángulo de contacto y de igual manera se observa una baja relación entre el volumen de aceite y el nivel de contaminación del -0,051 considerando el efecto del ángulo de contacto sobre el volumen de aceite. El cuadro presenta los coeficientes para el modelo matemático y el valor t (t de student) indica la significatividad de los coeficientes en la ecuación.

• **Dióxido de carbono (CO₂)**

Las mediciones de los porcentajes de CO₂, producidos por el proceso de limpieza con plasma frío a presión se presentan en la tabla 4.28:

Cuadro 4.28: Datos de dióxido de carbono a diferentes ángulos y volúmenes.

		Volumen		
		0.1 ml	0.5 ml	1 ml
Ángulo	∠ 16°	0,2	0,2	0,2
	∠ 36°	0,1	0,1	0,1
	∠ 53°	0,1	0,1	0,1

Fuente: Investigador

Análisis de los datos con SPSS:

Cuadro 4.29: Resumen del modelo CO₂.

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación
1	,888 ^a	,789	,719	,02650

a. Variables predictoras: (Constante), Angulo, Volumen

b. Variable dependiente: CO2

Estadísticos de cambio					Durbin-Watson
Cambio en R cuadrado	Cambio en F	gl1	gl2	Sig. Cambio en F	
,789	11,242	2	6	,009	,999

Fuente: Software SPSS

De acuerdo con el valor de R obtenido de 0,888 se establece que existe una correlación múltiple del 88,8 % entre el porcentaje de CO₂ y sus predictoras el ángulo de contacto y el volumen de aceite, además el valor de R cuadrado de 0,789 nos indica que el 78,9 % de las variaciones del nivel de CO₂ se deben a los cambios del volumen de aceite y el ángulo de contacto. También se establece con el R cuadrado ajustado que el 71,9 % de las variaciones del CO₂ se debe a las variables independientes con un error de estimación de 0,02650.

El coeficiente de Durbin Watson de 0,999 indica que existe independencia de errores entre las variables y el modelo se encuentra correctamente planteado.

Cuadro 4.30: **Análisis Anova CO₂.**

ANOVA ^a						
Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	,016	2	,008	11,242	,009 ^b
	Residual	,004	6	,001		
	Total	,020	8			

a. Variable dependiente: CO₂

b. Variables predictoras: (Constante), Angulo, Volumen

Fuente: Software SPSS

Decisión:

De acuerdo con el valor-p (Sig.) = 0,004 < α = 0,05, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la alternativa, donde la interacción del volumen de aceite y el ángulo de contacto inciden directamente en el nivel de contaminación de CO₂ generado por el plasma frío a baja presión.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + e$$

$$Y = \beta_0 + \beta_1 (\text{ángulo de contacto}) + \beta_2 (\text{volumen de aceite}) + \text{error tip. de la estimación}$$

$$\%CO_2 = 0,230 - 0,003 (\text{ángulo de contacto}) - 0,000 (\text{volumen de aceite}) + 0,02650$$

$$\%CO_2 = 0,230 - 0,003 (\text{ángulo de contacto}) + 0,02650$$

Cuadro 4.31: Análisis de coeficientes CO₂.

Coeficientes ^a					
Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes tipificados	t	Sig.
	B	Error típ.	Beta		
1 (Constante)	,230	,026		8,966	,000
Volumen	,000	,024	,000	,000	1,000
Angulo	-,003	,001	-,888	-4,742	,003

Correlaciones			Estadísticos de colinealidad	
Orden cero	Parcial	Semiparcial	Tolerancia	FIV
,000	,000	,000	1,000	1,000
-,888	-,888	-,888	1,000	1,000

Fuente: Software SPSS

De acuerdo al valor FIV igual a 1, de la tabla 4.31, no existe correlación entre las variables independientes y de acuerdo a las correlaciones de orden cero, parcial y semiparcial no existe correlación, asociación y relación del volumen de aceite con el nivel de contaminación del CO₂, y de manera distinta el ángulo de contacto presenta unas correlaciones al 88,8 % (-0,888) sobre los porcentajes del CO₂ generado en la limpieza por plasma.

• **Hidrocarburos (HC)**

Las mediciones de los porcentajes de HC, producidos por el proceso de limpieza con plasma frío a presión se presentan en la tabla 4.32:

Cuadro 4.32: Datos de hidrocarburos a diferentes ángulos y volúmenes.

		%HC		
		Volumen		
Ángulo		0.1 ml	0.5 ml	1 ml
	∠ 16°	2133	2226	2180
	∠ 36°	1138	1095	1089
	∠ 53°	1026	1007	1015

Fuente: Investigador

Análisis de los datos con SPSS:

Cuadro 4.33: Resumen del modelo HC.

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación
1	,918 ^a	,842	,789	257,587

a. Variables predictoras: (Constante), Angulo, Volumen

b. Variable dependiente: Hidrocarburos

Estadísticos de cambio					Durbin-Watson
Cambio en R cuadrado	Cambio en F	gl1	gl2	Sig. Cambio en F	
,842	15,977	2	6	,004	1,018

Fuente: Software SPSS

De acuerdo con el valor de R obtenido de 0,918 se establece que existe una correlación múltiple del 91,8 % entre el porcentaje de HC y sus predictoras el ángulo de contacto y el volumen de aceite, además el valor de R cuadrado de 0,842 nos indica que el 84,2 % de las variaciones del nivel de HC se deben a los cambios del volumen de aceite y el ángulo de contacto. También se establece con el R cuadrado ajustado que el 78,9 % de las variaciones de los HC se debe a las variables independientes con un error de estimación de 257,587.

El coeficiente de Durbin Watson de 1,018 indica que existe independencia de errores entre las variables (no existe autocorrelación) y el modelo se encuentra correctamente planteado.

Cuadro 4.34: **Análisis Anova HC.**

ANOVA ^a						
Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	2120188,562	2	1060094,281	15,977	,004 ^b
	Residual	398107,438	6	66351,240		
	Total	2518296,000	8			

a. Variable dependiente: Hidrocarburos

b. Variables predictoras: (Constante), Angulo, Volumen

Fuente: Software SPSS

Decisión:

De acuerdo con el valor-p (Sig.) = 0,004 < α = 0,05, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la alternativa, donde la interacción del volumen de aceite y el ángulo de contacto inciden directamente en el nivel de contaminación de HC generado por el plasma frío a baja presión.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + e$$

$$Y = \beta_0 + \beta_1 (\text{ángulo de contacto}) + \beta_2 (\text{volumen de aceite}) + \text{error tip. de la estimación}$$

$$(\text{ppm}) \text{ HC} = 2560,822 - 32,097 (\text{ángulo de contacto}) - 5,820 (\text{volumen de aceite}) + 257,587$$

Cuadro 4.35: Análisis de coeficientes HC.

Coeficientes ^a					
Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes tipificados	Sig.
		B	Error típ.	Beta	
1	(Constante)	2560,822	249,674		,000
	Volumen	-5,820	233,209	-,004	,981
	Angulo	-32,097	5,678	-,918	,001

a. Variable dependiente: Hidrocarburos

Correlaciones			Estadísticos de colinealidad	
Orden cero	Parcial	Semiparcial	Tolerancia	FIV
-,004	-,010	-,004	1,000	1,000
-,918	-,918	-,918	1,000	1,000

Fuente: Software SPSS

De acuerdo al valor FIV igual a 1, de la tabla 4.35, no existe correlación entre las variables independientes y de acuerdo a las correlaciones de orden cero, parcial y semiparcial existe una mínima correlación al 0,4%, asociación al 1% y una relación al 0,4% del volumen de aceite con el nivel de contaminación de los HC, y de manera distinta el ángulo de contacto presenta unas correlaciones al 91,8% (-0,918) sobre los porcentajes de los hidrocarburos generado en la limpieza por plasma.

CONCLUSIONES

Conclusión general:

Se determinó que los gases generados en el proceso de limpieza de láminas metálicas con plasma frío a baja presión son hidrocarburos (HC), monóxido de carbono (CO) y el dióxido de carbono (CO₂), y que los valores del ángulo de contacto producido entre una gota de agua desionizada con la superficie de la lámina metálica que representan el nivel de limpieza, influyen en el nivel de los gases generados, estableciéndose que ha menor ángulo de contacto produce una mayor contaminación.

Conclusión específica 1

Al analizar los gases generados por la aplicación de un plasma frío a baja presión o gas ionizado en la limpieza de láminas metálicas utilizadas para productos de línea blanca se detectó monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂) e hidrocarburos (HC), los mismos que presentaron una correlación con la cantidad de volumen de aceite lubricante LUBE HD – 2 removido de la superficie, siendo una correlación muy alta del 0,96 con el monóxido de carbono, alta con los hidrocarburos y el dióxido de carbono al 0,70 y 0,88 respectivamente.

Conclusión específica 2

Se estableció que los valores del ángulo de contacto influyen en el nivel de los gases generados en la limpieza de láminas metálicas aplicando plasma frío a baja presión. Analizando las medias de los datos obtenidos el nivel del monóxido de carbono CO tiene un incremento aproximado del 80 % al disminuir de 53° a 16°, de igual manera el CO₂ se incrementa en un 100 % y los hidrocarburos en un aproximado de un 119 %.

Conclusión específica 3

Al analizar la incidencia del volumen de aceite y el ángulo de contacto en el nivel de contaminación generada por el plasma frío a baja presión en la limpieza de láminas metálicas para productos de línea blanca se determinó que el volumen de aceite no incide en el nivel de contaminación del dióxido de carbono (CO_2). En el monóxido de carbono (CO) incide en un porcentaje menor al 12 % y en los hidrocarburos (HC) en un porcentaje menor al 1 %. El ángulo de contacto incide directamente sobre el nivel de contaminación con un porcentaje superior al 90 % en el monóxido de carbono (CO) con los hidrocarburos (HC) y en un 88,8 % en el dióxido de carbono (CO_2). Se estableció que no existe correlación entre el volumen de aceite y el ángulo de contacto, de acuerdo con el valor de la varianza inflada igual a 1 y de los valores del coeficiente de Durbin Watson que se encuentran entre 0,629 y 1,699 de acuerdo al número de variables independientes y muestras analizadas.

RECOMENDACIONES

En futuras investigaciones se recomienda optimizar el control de los parámetros de la generación de plasma frío a baja presión para determinar si es posible controlar los niveles de los gases generados del proceso, manipulando el porcentaje de mezcla de los gases generadores oxígeno y argón para controlar el porcentaje de las reacciones químicas favoreciendo al incremento o disminución de un gas contaminante.

De acuerdo a la teoría de los enlaces atómicos los más débiles son los enlaces de Vanderwals por lo que se podría establecer que son los primeros enlaces que se rompen y considerar que forman el dióxido de carbono en porcentajes constantes a las condiciones de experimentación planteadas en la presente investigación, por lo que se recomienda en futuras investigaciones utilizar líquidos conocidos donde se pueda calcular la cantidad de dióxido de carbono previo a un volumen establecido y realizar la experimentación para comprobar si lo calculado es igual a lo experimentado y poder fortalecer o descartar que el primer gas desprendido es el dióxido de carbono a porcentajes constantes.

Se recomienda analizar el efecto de la composición química, la rugosidad y la microestructura del material a ser analizado en la tensión superficial y el grado de limpieza de la superficie. Es importante considerar que la tensión superficial entre el líquido de prueba para medir el ángulo de contacto y la superficie de la lámina metálica son fundamentales en la limpieza por plasma frío a baja presión debido a que el acabado superficial junto con la microestructura mantienen estable la tensión superficial manteniendo siempre una capa de aceite constante en la superficie donde el gas ionizado no rompe los enlaces de las moléculas dando una condición para que se mantenga constante el ángulo de contacto sin importar el volumen desprendido de la superficie.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbasian, A., Ghaffarian, S., Mohammadi, N., y Fallahi, D. (2004). Sensitivity of surface free energy analysis methods to the contact angle changes attributed to the thickness effect in thin films. *Journal of applied polymer science*, 93:972 – 980.
- Albella, J. (2003). *Láminas delgadas y recubrimientos. Preparación, propiedades y aplicaciones*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- Angostino, R., Favia, P., Oehr, C., y Wertheiner, M. (2005). Low temperature plasma processing of materials: Past, present and future. *Plasma Processes and Polymers*, 2:7 – 15.
- Antón, R. (2005). Tensión interfacial. Cuaderno Firp S203-A. Universidad de los Andes. Merida - Venezuela. Disponible en <http://www.plasmatreat.com>.
- Askeland, D. y Fulay, P. (2012). *The Science and Engineering of Materials*. México DF. México. International Thomson Publishing.
- Asociación de Industriales Latinoamericanos AILA (2016). *El sector industrial es clave para el desarrollo económico y social*. Recuperado de <http://aila.la/2016/05/el-sector-industrial-es-clave-para-el-desarrollo-economico-y-social/>.
- Ballester, F. (2005). Contaminación atmosférica, cambio climático y salud. *Revista Española de Salud Pública*, 79:159 – 175.
- Ban, K.-m. (2008). *La economía de los ecosistemas y la biodiversidad*. Camdridge. Reino Unido.
- Bautista, L., Crespo, L., y De la Varga, M. (2008). Tecnología plasma. *LEITAT Technological Center*, 12:11 – 21.

- Berdún, F. (2002). Mejora medioambiental del proceso de galvanización. *Primer catálogo aragonés de buenas prácticas*, 27.
- Blanes, J. y De la Quintana, D. (2010). Contaminación del agua. *Redesma*, 4(2):1 – 76.
- Blasco, M. (2012). Proceso de sedimentación de precipitados procedentes del tratamiento de los efluentes de una industria de recubrimiento de superficies metálicas. Master tesis, Universidad Politécnica de Valencia.
- Bunge, M. (2006). *A la caza de la realidad*. Madrid. España. Editorial Gedisa S.A.
- Cano, E., Simancas, J., Narvaéz, L., y Bastidas, J. (2004). Estudio de la corrosión del cobre por vapores de ácido acético al 40 y 80 % de humedad relativa. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*.
- Carrillo, J. (2014). *Estudio de la recuperación del zinc presente en los baños agotados de decapado procedentes de la industria de galvanizado de zinc en caliente mediante técnicas electroquímicas*. PhD tesis, Universidad Politécnica de Valencia.
- Castro, D. y Vásquez, O. (1997). Termodinámica del plasma. *Ingeniería y Desarrollo. Universidad del Norte*, 2:23 – 27.
- Chang, R. y College, W. (2002). *Química*. Mc Graw Hill, Séptima edición.
- Chico, B., Fuente, D., Simancas, J., y Morcillo, M. (2014). Corrosión atmosférica de metales. efecto de parámetros meteorológicos y de contaminación. *Cento Nacional de Investigaciones Metalúrgicas*.
- Cruz, J., Osuna, M., y Ortiz, j. (2008). *Química general*. Universidad Autónoma de Sinaloa, Segunda edición.
- Diener (2015). Electronic diener plasma – surface – technology. *Journal of Vacuum Science and Technology*, 11.
- Diener (2019a). Atmospheric pressure plasma. Recuperado de [https://www.plasma.com/en/plasmatechnik/atmospha rendruckplasma/](https://www.plasma.com/en/plasmatechnik/atmospha%20druckplasma/).

- Diener (2019b). Introducción al plasma. Recuperado de <https://www.plasma.com/es/plasmatechnik/introduccion-al-plasma/>.
- Dow Corning Plasma Solutions (2006). Introduction to Dow Corning Plasma Solution's Atmospheric Pressure Plasma Liquid Deposition. Revolutionizing the Business of Surface Engineering.
- El mercurio (2013). Desarrollo industrial de la línea blanca en la ciudad de cuenca. Technical report.
- Ewald, k. y Eppendor, A. (2016). Impact of pipetting techniques on precision and accuracy. Recuperado de <https://www.dutscher.com>.
- Figueroa, R., Valdovinos, C., Araya, E., y Parra, O. (2003). Macroinvertebrados bentónicos como indicadores de calidad de agua de ríos del sur de Chile. *Revista chilena de historia natural*, 76(2):275 – 285.
- Frias, C. y Perez, O. (1998). Recuperación de ácidos e metales en baños agotados del decapado de aceros inoxidable. *Revista de Metalurgia*, pp. 427 – 431.
- Gamarra, G., Rivera, T., Wong, F., y Pujay, O. (2015). *Estadística e Investigación*. Lima. Perú. Editorial San Marcos.
- Gillis, J. (2006). Ángulo de contacto. [figura]. Recuperado de: <https://es.wikipedia.org/wiki/>.
- Gonzáles, J. (1999). La pintura como inhibidor de corrosión en las estructuras de acero especialmente expuestas y su rendimiento. *Revista de Metalurgia*, 51.
- Gordillo, F. (2008). Plasmas fríos. *Investigación y Ciencia*, pp. 70 – 79.
- Hirth, T. (2012). Plasma technology - key technology for the production of functional surfaces. *Fraunhofer Institute for Engineering and Biotechnology IGB. Germany*, 12.
- Ipek, N., Lior, N., y Eklund, A. (2005). Mejora del decapado electrolítico de metales, proceso por el aislamiento entre los electrodos. *Metalúrgicas y de fabricación de acero*, 32(1):87 – 96.

- ISO (2011). Protección anticorrosiva de estructuras de acero mediante pintura.
- Kane, D. y Mital, K. (1974). Plasma cleaning of metal surfaces. *Journal of Vacuum Science and Technology*, 11:567 – 569.
- Ken, D. (2000). Chemical cleaning of metals.
- Kogevinas, M. y G, J. (2000). Dioxinas y salud. *scielo*, 12(2):115–740.
- Korsec, D., Rapp, J., Theirich, D., y J, E. (1994). Cleaning of metal parts in oxygen radio frequency plasma: Process study. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 12(2):567 – 569.
- Kwok, D. y Neuman, A. (1999). Contact angle measurement and contact angle interpretation. *Advances in Colloid and Interface Science*, 81(3):167 – 249.
- Lira, J. (2018). Hasta un 11 % crecería la venta de electrodomésticos. *Gestión*, (Recuperado de: <https://archivo.gestion.pe/noticia/297337/hasta-11-creceria-venta-electrodomesticos>).
- Llopis, J. (2019). *La estadística. una orquesta hecha instrumento*. Recuperado de <https://estadistica-orquestainstrumento.wordpress.com/2012/12/13/test-de-durbin-watson/>.
- López, R., Valencia, R., Mercado, A., Peña, R., Muñoz, A., Barocio, S., y Rodríguez, B. (2010). Aplicaciones de los plasmas en la modificación de materiales, en medio ambiente y medicina. Technical report, Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares al avance de la Ciencia y la Tecnología en México.
- Losadhesivos (2019a). Ángulo de contacto. Recuperado de <https://www.losadhesivos.com/angulo-de-contacto.html>.
- Losadhesivos (2019b). Preparación de superficies con plasma. Recuperado de <https://www.losadhesivos.com/plasma.html>.
- López, F., Vila, F., Martín, J., y Delgado, A. (1998). Reciclado de las aguas de decapado. In *Revista de Metalurgia*.

- Ma, K., Chung, T., y Good, R. (1998). Surface energy of thermotropic liquid crystalline polyesters and polyesteramide. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 36(13):2327 – 2337.
- Martínez Alméciga, J. G. (2012). Deposición y análisis del crecimiento de películas delgadas de silicio fabricado por pecvd. Master tesis, Universidad Nacional de Colombia.
- Ministerio del Ambiente (2015). *Reforma del libro VI del texto unificado de la legislación secundaria*. Acuerdo No. 061.
- Ministerio del Medio Ambiente y FUNDES (2016). *Guía de Buenas Prácticas para el Sector Galvanotécnica*.
- Molina, E., Brown, L. A., Prieto, V., Bonet, M., y Cuéllar, L. (2001). Crisis de asma y enfermedades respiratorias agudas: Contaminantes atmosféricos y variables meteorológicas en Centro Habana. *Revista Cubana de Medicina General Integral*, 17:10 – 20.
- Molina, M. (2019). Factor de inflación de la varianza. Recuperado de <https://www.ciencia-sinseso.com/tag/factor-de-inflacion-de-varianza/>.
- Mortazavi, Z., Ghoranneviss, M., y Sari, A. (2011). Effect of low pressure nitrogen–oxygen plasma treatment on surface properties of polypropylene films. *Journal of Fusion Energy*, 30(1):48 – 52.
- Navrátil, Z., Bursikova, V., Stahel, P., Sira, M., y Zverina, P. (2004). On the analysis of surface free energy of dlc coatings deposited in low pressure rf discharge. *Czechoslovak Journal of Physics*, 10:29 – 38.
- Negrete, A., Tagle, A., Múgica, J., y Oñate, J. (1997). *Tecnologías asistidas por plasma. Fundamentos, aplicaciones industriales y tecnológicas*. Barcelona. España. McGraw-Hill/Interamericana S.A.
- Neto, E., Lambert, C., Bittencourt, E., y Aguila, Z. (2007). Combinación de análisis de xps y análisis goniométrico para el estudio de la remoción del aceite superficial en aluminio utilizando plasma frío. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, pp. 108 – 119.

- Nickerson, R. (1998). Plasma surface modification for cleaning and adhesion. *AST Products, Inc*, Billerica, MA. 01821.
- Njobuenwu, D., Oboho, E., y Gumus, R. (2007a). Determination of contact angle from contact area of liquid droplet spreading on solid substrate. *Electronic Journal of Practices and Technologies*, 10:29 – 38.
- Njobuenwu, D., Oboho, E., y Gumus, R. (2007b). Determination of contact angle from contact area of liquid droplet spreading on solid substrate. *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, 10:29 – 38.
- Olea, N., Fernández, F., Araque, y Olea-Serrano, P. (2002). Perspectivas en disrupción endocrina. *scielo*, 11(1):250 –6.
- OMS (2008). Prevesolid y control integrados de la contaminación.
- Pallicer, M. (2016). Por qué mojan los líquidos. Recuperado de <http://fisicadebar.com/2016/06/14/por-que-los-liquidos-mojan/>.
- Pauwels, M. (2013). low pressure plasma used for automotive polymers. *europlasma. Journée technique automotive*, 18(167).
- Plasmatreat (2019). Tecnología de plasma. Innovadora tecnología clave para limpieza, activación y aplicación de recubrimiento en diversas superficies. Recuperado de <https://www.plasmatreat.com>.
- Porta, M., Kogevinas, M., Zumeta, E., Sunyer, J., Ribas-Fito, N., Ruiz, L., Jario, M., Vioque, J., Alguacil, J., Martin, P., Malats, N., y Ayude, D. (2002). Grupo de Trabajo sobre Compuestos Tóxicos Persistentes y Salud del IMIM. Concentraciones de compuestos tóxicos persistentes en la población española: el rompecabezas sin piezas y la protección de la salud pública. *scielo*, pp. 66 – 257.
- Pozas, A., Sánchez, R., Cardona, A., Sáenz, A., y Vasco, A. (2019). *Química*. McGraw - Hill Educación. Recuperado de <https://www.mheducation.es/bcv/guide/capitulo/8448609603.pdf>.

- Rada, G. (2007). Unidad de análisis. *Universidad Católica de Chile*.
- Reichel, K. y Fellenberg, R. (2001). Plasma technology, process diversity - sustainability. *VDI Technology Center Duesseldorf. Germany*.
- Reliabilityweb.com (2019). Los lubricantes Parte 1. Recuperado de <https://reliabilityweb.com/sp/articles/entry/los-lubricantes/>.
- Rodriguez, C. (2014). *Tratamientos superficiales sobre materiales de alta energía superficial*. PhD tesis, Universidad Carlos III de Madrid.
- Rosales, J. A., Torres, V. M., Olaiz, G., y Borja, V. H. (2001). Los efectos agudos de la contaminación del aire en la salud de la población: evidencias de estudios epidemiológicos. *Salud Pública de México*, 43:544 – 555.
- Saettone, E. (2010). Aplicaciones de la física de plasmas en la industria. *Universidad de Lima. Ingeniería Industrial*, (28):195– 210.
- Samaniego, H. (2006). *Valoración de efluentes de decapado ácido metálico. Recuperación de Zinc*. PhD tesis, Universidad de Cantabria.
- Sampieri, R., Fernández, C., y Bautista, M. (2010). *Metodología de la investigación*. McGraw - Hill, primera edición.
- Sanchez, I., De Luxan, P., y Frias, M. (1986). Inductively coupled plasma emission spectrometry. *Materiales de construcción*, 36(202).
- Sarmiento, P., López, L., Sarmiento, A., y Fajardo, J. (2012). Efficiency of the low pressure cold plasma in the cleaning of steel for subsequent covering. *Andean Region International Conference (ANDESCOM)*, VI:115 – 118.
- Sauthier, G. (2012). *Preparación y caracterización de capas delgadas y estructuras de óxido de titanio para aplicaciones fotocatalíticas activadas mediante radiación UV o visible*. PhD tesis, Universidad Autónoma de Barcelona.
- Sevilla, M. (1993). Teoría de errores de observación. *Física de la Tierra. Universidad Complutense*, Madrid. España. Recuperado de <http://revistas.ucm.es/>.

- Shaw, D. (1970). *Introducción a química de superficies y coloides*. Alhambra S.A.
- Simancas, J. y Morcillo, M. (1998). Factores condicionantes de la durabilidad de los sistemas de pinturas anticorrosivas sobre acero en exposiciones atmosféricas. *Revista de Metalurgia*, 34.
- Smith, K. R., Corvalán, C. F., y Kjellstrom, T. (1999). How much global ill health is attributable to environmental factors. *Epidemiology (Cambridge, Mass.)*, 10(5):573–584. PMID: 10468437.
- SusChem (2008). Boletín SusChem España. *Plataforma Tecnológica Española de Química Sostenible*, (12):48 – 52.
- Tendero, C., Tixier, C., Tristant, P., Desmaison, J., y Leprince, P. (2006). Atmospheric pressure plasmas: A review. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 61:2 – 30.
- Trujillo, R. (2012). *Hidrocarburos. Manejo seguro*. Linotipia Bolívar, cuarta edición.
- Vargas, M. F. (2005). La contaminación ambiental como factor determinante de la salud. *Revista Española de Salud Pública*, 79:117 – 127.
- Villalobos, M., Peñalosa, D., Moscona, M., Cram, M., y Heydrich, F. (1990). Opciones para el tratamiento y la disposición de los licores ácidos agotados provenientes del decapado de hierro. *Portal de revistas científicas y arbitradas de la UNAM*.
- Weissermel, k. y Jurgen, A. (1981). *Química Orgánica Industrial*, volume 1. Editorial Reverté.
- Wonmi, G., Bucheon, S., y Gyeonggi, D. (2019). Automotive Emission Analyze QGA - 6000 Operating Manual. Recuperado de <https://www.qrotech.com>.
- Zenkiewicz, M. (2007). Methods for the calculation of surface free energy of solids. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 24(1):137 – 145.
- Zumárraga, m. (2018). *Análisis de regresión simple y multivariante*. Universidad Politécnica Salesiana.

ANEXOS

Anexo A: Oxígeno - Alta Pureza



Denominación: Oxígeno (O₂)

Pureza:

Oxígeno 4.5	Oxígeno 5.0
≥ 99,995%	≥ 99,999%

Impurezas, ppm/v:

N ₂	≤ 20	≤ 5
Ar	≤ 10	≤ 2
H ₂ O	≤ 5	≤ 3
C _n H _m	≤ 0,5	≤ 0,2
CO ₂	≤ 0,5	≤ 0,2

Otras purezas bajo demanda.

Certificado de control: Cada botella se entrega con su tarjeta de control indicando la pureza del gas. A petición del cliente se suministra un certificado individual de las impurezas.

Forma de suministro: Botellas de acero

Pureza	Capacidad litro	Diámetro mm	Altura con tulipa mm	Peso total aprox. llenas kg	Presión llenado (15°C) bar	Contenido gas m ³
5.0	50	229	1.640	80	200	10,6

Minican® - Linde: Oxígeno 4.5
presión/contenido aprox. 12 bar/12 litros gas.

Botellin - Linde: Oxígeno 4.5
presión/contenido aprox. 185 bar/76 litros gas.

En caso de interés, solicitar catálogo "Gases en pequeños recipientes".

Otros tamaños y purezas bajo demanda.

Identificación: Botella con cuerpo de color negro RAL 9005 y ojiva blanca RAL 9010, con la etiqueta indicativa de "Oxígeno Alta Pureza".

Conexión: Válvula de la botella: R 5/8" (W 22,91 x 1/14") MIE-AP7 tipo F.

Factores de conversión:

m ³ gas (1 bar y 15 °C)	litros gas licuado (en equilibrio a 1 bar)	kg
1	1,172	1,337
0,853	1	1,141
0,748	0,876	1

Características: El oxígeno es un gas incoloro e inodoro, formando parte del aire atmosférico en un 20,95% vol. El oxígeno no es tóxico. Al ser intensamente oxidante, debe evitarse todo contacto con sustancias fácilmente combustibles, ya que puede provocar su inflamación. Todos los accesorios y elementos que puedan entrar en contacto con el oxígeno deben estar exentos de grasa, aceites y lubricantes.

Fórmula química:	O ₂	
Masa molar:	32,00 g/mol	
Punto triple:	Temperatura:	54,4 K (-218,8 °C)
	Presión:	1,5 mbar
	Calor latente de fusión:	13,9 kJ/kg
Punto de ebullición a 1.013 mbar:	Temperatura:	90,2 K (-183,0 °C)
	Calor latente de ebullición:	213 kJ/kg
Punto crítico:	Temperatura:	154,6 K (-118,6 °C)
	Presión:	50,4 bar
	Densidad:	0,436 kg/litro
Estado gaseoso a 1 bar y 15° C:	Densidad relativa al aire:	1,105

Aplicaciones: Industria química
Industria de semiconductores
Medicina
Instrumentación laboratorio
Instrumentación electrónica
Investigación y desarrollo

Otras formas de suministro de Oxígeno:

- Oxígeno
- Oxígeno Medicinal
- Mezclas con oxígeno: Aire Sintético, O₂/N₂, O₂/He, O₂/CO₂ y O₂/Ar
- Oxígeno Líquido
- Oxígeno Líquido Medicinal
- Oxígeno 3.5
- Laserline® - Oxígeno Ultra
- Biogón® - O
- Odorox®



Región Nordeste:
Bailén, 105 - 08009 BARCELONA
Tel. Call Center: 902 426 462 - Fax: 902 181 078
e-mail: ccenternordeste@es.linde-gas.com

Región Centro:
Ctra. Alcalá - Daganzo, km. 3,8
Pol. Ind. Bahueros, c/ Haili, 1
28806 ALCALÁ DE HENARES (Madrid)
Tel. Call Center: 902 426 464 - Fax: 918 776 110
e-mail: ccentercentro@es.linde-gas.com

Región Levante:
Camino de Liria s/n, Apdo. de Correos, nº 25
46530 PUÇOL (Valencia)
Tel. Call Center: 902 426 463 - Fax: 961 424 143
e-mail: ccenterlevante@es.linde-gas.com

Región Sur:
Gibraltar, s/n - 11011 CÁDIZ
Tel. Call Center: 902 426 465
Fax: 956 284 051
e-mail: ccentersur@es.linde-gas.com

Anexo B: Argon - Alta Pureza



Denominación:	Argón (Ar)				
Pureza:		Argón 5.0	Argón 5.3	Argón 5.6	Argón 6.0
		≥ 99,999%	≥ 99,9993%	≥ 99,9996%	≥ 99,9999%
Impurezas, ppm/v:	O ₂	≤ 2	≤ 1	≤ 0,7	≤ 0,5
	H ₂ O	≤ 3	≤ 2	≤ 1	≤ 0,5
	C _n H _m	≤ 0,2	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1

Certificado de control: Cada botella se entrega con su tarjeta de control indicando la pureza del gas.
A petición del cliente se suministra un certificado individual de las impurezas.

Forma de suministro: Botellas de acero

Pureza	Capacidad litros	Diámetro mm	Altura con tulipa mm	Peso total aprox. llenas kg	Presión llenado bar (15°C)	Contenido gas m ³
5.0, 5.6 6.0	50	229	1.640	85	200	10,5
5.0	10/13	140	970	17	200	2,6
5.0	5	140	586	10	200	1,3

Bloques de botellas 12 bot. x 50 l (1), 13 bot. x 40 l (2), 10 bot. x 50 l (3).

Pureza	Volumen bloque litros	Presión llenado (15 °C) bar	Contenido gas m ³
(1) 5.0	600	200	126
(2) 5.0	570	150	81,9
(3) 5.0	500	200	105

Minican® - Linde: Argón 5.0
presión/contenido aprox. 12 bar/12 litros gas.

Botellín - Linde: Argón 5.3
presión/contenido aprox. 200 bar/80 litros gas.

En caso de interés, solicitar catálogo "Gases en pequeños recipientes".

Otras tamaños bajo demanda.

Identificación: Botellas con cuerpo de color negro RAL 9005 y ojiva amarilla RAL 1028, con la etiqueta
indicativa de "Argón Alta Pureza".

Conexión: Válvula de la botella: W 21,7 x 1/14" MIE-AP7, tipo C.
Válvula de bloque: M 30 X 2

Factores de conversión:

m ³ gas (1 bar y 15 °C)	litros gas licuado (en equilibrio a 1 bar)	kg
1	1,196	1,669
0,836	1	1,395
0,599	0,717	1

Características:

El Argón es un gas noble incoloro e inodoro, formando parte del aire atmosférico en un 0,93% vol.

No es inflamable ni tóxico.

Fórmula química: Ar

Masa molar: 39,95 g/mol

Punto triple: Temperatura: 83,8 K (-189,4 °C)
Presión: 687 mbar
Calor latente de fusión: 29,3 kJ/kg

Punto de ebullición a 1.013 mbar: Temperatura: 87,3 K (-185,9 °C)
Calor latente de ebullición: 160,8 kJ/kg

Punto crítico: Temperatura: 150,80 K (-122,4 °C)
Presión: 49 bar
Densidad: 0,538 kg/litro

Estado gaseoso a 1 bar y 15° C: Densidad relativa al aire: 1,380

Aplicaciones:

Como gas de protección para todos los procesos en los que pueda interferir la presencia de trazas de gases químicamente activos:

En la técnica de soldadura.

Para la técnica de dopado y grabado para la fabricación de semiconductores y circuitos en la industria electrónica.

Para tubos de iluminación y lámparas de incandescencia.

En análisis metalúrgico por espectrometría de emisión (ES) y en análisis por medio de plasma inducido por acoplamiento (ICP).

En absorción atómica (AAS) con cámara de grafito.

Como gas portador en cromatografía de gases (GC).

Para procesos especiales en el campo científico analítico de Investigación y Desarrollo.

Otras formas de suministro de Argón:

- Argón.

- Mezclas con base Argón: Corgón[®], Corgón[®] S, Corgón[®] He, Varigón[®] H, Varigón[®] H Alta Pureza, Varigón[®] He, Argón Lámpara, Gas PR, Cronigón[®], Cronigón[®] S.

- Argón Líquido.

ABELLO LINDE, S.A. empresa con sistema de calidad y medio ambiente certificado por:



Región Nordeste:
Bailén, 105 - 08009 BARCELONA
Tel. Call Center: 902 426 462 - Fax: 902 181 078
e-mail: ccenternordeste@es.linde-gas.com

Región Centro:
Ctra. Alcalá - Daganzo, km. 3,8
Pol. Ind. Bahueros, c/. Haili, 1
28806 ALCALÁ DE HENARES (Madrid)
Tel. Call Center: 902 426 464 - Fax: 918 776 110
e-mail: ccentercentro@es.linde-gas.com

Región Levante:
Camino de Liria s/n, Apdo. de Correos, nº 25
46530 PUÇOL (Valencia)
Tel. Call Center: 902 426 463 - Fax: 961 424 143
e-mail: ccenterlevante@es.linde-gas.com

Región Sur:
Gibraltar, s/n - 11011 CÁDIZ
Tel. Call Center: 902 426 465
Fax: 956 784 051
e-mail: ccentersur@es.linde-gas.com

Anexo C: Equipo analizador de gases

Gas Analyzer(QGA-6000)



[Product details]

Special Features of Goods

- Outstanding accuracy, stability and durability
- NOx measurement upgradable(option)
- Temporary pause to measurement (HOLD function)
- Built-in printer (time & date) / RS232 PC program
- Six LED indicators
- Application: Vehicle inspection center, repair & tune up shop..etc.

Product Specifications

- Model: QGA-6000
 - Measuring items : CO, HC, CO₂, O₂, λ, AFR, NOX(option)
 - Measuring method : CO, HC, CO₂ -NDIR Method
O₂, NOx -Electrochemical Method
 - Measuring range : CO 0.00~10.00% HC 0~9999ppm (15000ppm: option)
CO₂ 0.0~20.0% O₂ 0.0~25.0% NOx 0~5000ppm
λ 0.000~2.000 AFR 0.0~99.0
 - Warming-up time : About 2~8 minutes
 - Power supply : AC110V or AC220V ±10% 50/60 Hz
 - Dimensions : About 430(W) x 300(D) x 177(H) mm
 - Weight : About 7.5kg (Body)
-

	QGA 6000			
Medición	CO, HC, CO ₂ , O ₂ , Lambda, AFR, NO _x (opcional)			
Método de medición	CO, HC, CO ₂ : Método NDIR O ₂ , NO _x : Célula Electroquímica			
Rango de medición	CO	0.00 ~ 9.99%	HC	0 ~ 9999 ppm
Resolución		0.01%		1 ppm
Display		4 dígitos LED 7segment		4 ó 5 dígitos LED 7segment
Rango de medición	CO ₂	0.0 ~ 20.0%	O ₂	0.00 ~ 25.00 %
Resolución		0.1%		0.01 %
Display		4 dígitos LED 7segment		4 dígitos LED 7segment
Rango de medición	Lambda	0 ~ 2.000	AFR	0.0 ~ 99.0
Resolución		0.001		0.1
Display		4 dígitos LED 7segment		4 dígitos LED 7segment
Rango de medición	NO _x (Opción)	0-5000 ppm		
Resolución		1 ppm		
Display		4 dígitos LED 7segment		
Repetibilidad	Menos de ±2% FS			
Tiempo de respuesta	Dentro de 10 segundos (más de 90%)			
Tiempo calentamiento	Aproximadamente 2 ~ 8 minutos			
Cantidad de muestra recogida	4 ~ 6 L/min			
Alimentación	220V CA o 110V CA ±10% 50 o 60Hz			
Consumo	Aproximadamente 50 W			
Temperatura de funcionamiento	0°C ~ 40°C			
Dimensiones	420 (W) × 298 (D) × 180 (H) el mm			
Peso	Aproximadamente 6.9 kg			
Accesorios básicos	Sonda, manguera de la Sonda, fusible de repuesto, tapón de prueba de fuga, filtro de repuesto, manual del Funcionamiento, cable de alimentación, cable de comunicación RS232, Impresora, papel de la impresora,			

Anexo D: Cuadro del Dióxido de Carbono a diferente ángulo de contacto

Dióxido de carbono (%) CO ₂				Dióxido de carbono (%) CO ₂			
Ensayo	∠ 16°	∠ 36°	∠ 53°	Ensayo	∠ 16°	∠ 36°	∠ 53°
1	0,2	0,1	0,1	21	0,2	0,1	0,1
2	0,2	0,1	0,1	22	0,2	0,1	0,1
3	0,2	0,1	0,1	23	0,2	0,1	0,1
4	0,2	0,1	0,1	24	0,2	0,1	0,1
5	0,2	0,1	0,1	25	0,2	0,1	0,1
6	0,2	0,1	0,1	26	0,2	0,1	0,1
7	0,2	0,1	0,1	27	0,2	0,1	0,1
8	0,2	0,1	0,1	28	0,2	0,1	0,1
9	0,2	0,1	0,1	29	0,2	0,1	0,1
10	0,2	0,1	0,1	30	0,2	0,1	0,1
11	0,2	0,1	0,1	31	0,2	0,1	0,1
12	0,2	0,1	0,1	32	0,2	0,1	0,1
13	0,2	0,1	0,1	33	0,2	0,1	0,1
14	0,2	0,1	0,1	34	0,2	0,1	0,1
15	0,2	0,1	0,1	35	0,2	0,1	0,1
16	0,2	0,1	0,1	36	0,2	0,1	0,1
17	0,2	0,1	0,1	37	0,2	0,1	0,1
18	0,2	0,1	0,1	38	0,2	0,1	0,1
19	0,2	0,1	0,1	39	0,2	0,1	0,1
20	0,2	0,1	0,1	40	0,2	0,1	0,1

Dióxido de carbono (%) CO ₂				Dióxido de carbono (%) CO ₂			
Ensayo	∠ 16°	∠ 36°	∠ 53°	Ensayo	∠ 16°	∠ 36°	∠ 53°
41	0,2	0,1	0,1	68	0,2	0,1	0,1
42	0,2	0,1	0,1	69	0,2	0,1	0,1
43	0,2	0,1	0,1	70	0,2	0,1	0,1
44	0,2	0,1	0,1	71	0,2	0,1	0,1
45	0,2	0,1	0,1	72	0,2	0,1	0,1
46	0,2	0,1	0,1	73	0,2	0,1	0,1
47	0,2	0,1	0,1	74	0,2	0,1	0,1
48	0,2	0,1	0,1	75	0,2	0,1	0,1
49	0,2	0,1	0,1	76	0,2	0,1	0,1
50	0,2	0,1	0,1	77	0,2	0,1	0,1
51	0,2	0,1	0,1	78	0,2	0,1	0,1
52	0,2	0,1	0,1	79	0,2	0,1	0,1
53	0,2	0,1	0,1	80	0,2	0,1	0,1
54	0,2	0,1	0,1	81	0,2	0,1	0,1
55	0,2	0,1	0,1	82	0,2	0,1	0,1
56	0,2	0,1	0,1	83	0,2	0,1	0,1
57	0,2	0,1	0,1	84	0,2	0,1	0,1
58	0,2	0,1	0,1	85	0,2	0,1	0,1
59	0,2	0,1	0,1	86	0,2	0,1	0,1
60	0,2	0,1	0,1	87	0,2	0,1	0,1
61	0,2	0,1	0,1	88	0,2	0,1	0,1
62	0,2	0,1	0,1	89	0,2	0,1	0,1
63	0,2	0,1	0,1	90	0,2	0,1	0,1
64	0,2	0,1	0,1	91	0,2	0,1	0,1
65	0,2	0,1	0,1	92	0,2	0,1	0,1
66	0,2	0,1	0,1	93	0,2	0,1	0,1
67	0,2	0,1	0,1	94	0,2	0,1	0,1

Dióxido de carbono (%) CO ₂				Dióxido de carbono (%) CO ₂			
Ensayo	∠ 16°	∠ 36°	∠ 53°	Ensayo	∠ 16°	∠ 36°	∠ 53°
95	0,2	0,1	0,1	122	0,2	0,1	0,1
96	0,2	0,1	0,1	123	0,2	0,1	0,1
97	0,2	0,1	0,1	124	0,2	0,1	0,1
98	0,2	0,1	0,1	125	0,2	0,1	0,1
99	0,2	0,1	0,1	126	0,2	0,1	0,1
100	0,2	0,1	0,1	127	0,2	0,1	0,1
101	0,2	0,1	0,1	128	0,2	0,1	0,1
102	0,2	0,1	0,1	129	0,2	0,1	0,1
103	0,2	0,1	0,1	130	0,2	0,1	0,1
104	0,2	0,1	0,1	131	0,2	0,1	0,1
105	0,2	0,1	0,1	132	0,2	0,1	0,1
106	0,2	0,1	0,1	133	0,2	0,1	0,1
107	0,2	0,1	0,1	134	0,2	0,1	0,1
108	0,2	0,1	0,1	135	0,2	0,1	0,1
109	0,2	0,1	0,1	136	0,2	0,1	0,1
110	0,2	0,1	0,1	137	0,2	0,1	0,1
111	0,2	0,1	0,1	138	0,2	0,1	0,1
112	0,2	0,1	0,1	139	0,2	0,1	0,1
113	0,2	0,1	0,1	140	0,2	0,1	0,1
114	0,2	0,1	0,1	141	0,2	0,1	0,1
115	0,2	0,1	0,1	142	0,2	0,1	0,1
116	0,2	0,1	0,1	143	0,2	0,1	0,1
117	0,2	0,1	0,1	144	0,2	0,1	0,1
118	0,2	0,1	0,1	145	0,2	0,1	0,1
119	0,2	0,1	0,1	146	0,2	0,1	0,1
120	0,2	0,1	0,1	147	0,2	0,1	0,1
121	0,2	0,1	0,1	148	0,2	0,1	0,1

Dióxido de carbono (%) CO ₂			
Ensayo	∠ 16°	∠ 36°	∠ 53°
149	0,2	0,1	0,1
150	0,2	0,1	0,1
151	0,2	0,1	0,1
152	0,2	0,1	0,1
153	0,2	0,1	0,1
154	0,2	0,1	0,1
155	0,2	0,1	0,1
156	0,2	0,1	0,1
157	0,2	0,1	0,1
158	0,2	0,1	0,1
159	0,2	0,1	0,1
160	0,2	0,1	0,1
161	0,2	0,1	0,1
162	0,2	0,1	0,1

Anexo E: Cuadro del Monóxido de Carbono a diferente ángulo de contacto

Monóxido de carbono (%) CO				Monóxido de carbono (%) CO			
Ensayo	∠ 16°	∠ 36°	∠ 53°	Ensayo	∠ 16°	∠ 36°	∠ 53°
1	0,45	0,41	0,31	21	0,47	0,37	0,35
2	0,45	0,42	0,27	22	0,48	0,42	0,29
3	0,45	0,37	0,27	23	0,48	0,38	0,25
4	0,45	0,36	0,35	24	0,48	0,38	0,32
5	0,45	0,37	0,32	25	0,48	0,35	0,28
6	0,45	0,41	0,27	26	0,48	0,33	0,31
7	0,45	0,41	0,3	27	0,48	0,39	0,26
8	0,45	0,37	0,26	28	0,48	0,39	0,3
9	0,46	0,36	0,31	29	0,48	0,38	0,33
10	0,46	0,37	0,26	30	0,48	0,42	0,34
11	0,46	0,37	0,32	31	0,49	0,38	0,27
12	0,46	0,39	0,32	32	0,49	0,42	0,27
13	0,47	0,33	0,35	33	0,49	0,4	0,33
14	0,47	0,36	0,27	34	0,49	0,35	0,3
15	0,47	0,39	0,31	35	0,49	0,36	0,29
16	0,47	0,36	0,32	36	0,49	0,41	0,31
17	0,47	0,42	0,26	37	0,5	0,38	0,26
18	0,47	0,4	0,35	38	0,5	0,39	0,3
19	0,47	0,37	0,28	39	0,5	0,34	0,35
20	0,47	0,38	0,26	40	0,5	0,37	0,31

Monóxido de carbono (%) CO				Monóxido de carbono (%) CO			
Ensayo	∠ 16°	∠ 36°	∠ 53°	Ensayo	∠ 16°	∠ 36°	∠ 53°
41	0,5	0,33	0,34	68	0,53	0,35	0,35
42	0,5	0,37	0,3	69	0,53	0,39	0,28
43	0,5	0,37	0,3	70	0,53	0,38	0,32
44	0,5	0,36	0,34	71	0,53	0,39	0,28
45	0,5	0,42	0,27	72	0,53	0,43	0,27
46	0,5	0,41	0,26	73	0,53	0,38	0,29
47	0,51	0,4	0,26	74	0,53	0,41	0,34
48	0,51	0,35	0,28	75	0,53	0,39	0,27
49	0,51	0,39	0,33	76	0,53	0,36	0,28
50	0,51	0,35	0,29	77	0,53	0,42	0,3
51	0,51	0,38	0,28	78	0,54	0,42	0,3
52	0,51	0,33	0,3	79	0,54	0,37	0,33
53	0,51	0,33	0,29	80	0,55	0,33	0,31
54	0,51	0,34	0,29	81	0,55	0,33	0,3
55	0,51	0,38	0,31	82	0,55	0,39	0,26
56	0,52	0,37	0,34	83	0,55	0,39	0,27
57	0,52	0,35	0,29	84	0,55	0,38	0,34
58	0,52	0,36	0,31	85	0,55	0,36	0,28
59	0,52	0,42	0,26	86	0,55	0,41	0,31
60	0,52	0,42	0,29	87	0,55	0,36	0,34
61	0,52	0,41	0,33	88	0,56	0,42	0,27
62	0,52	0,35	0,32	89	0,56	0,37	0,35
63	0,52	0,36	0,34	90	0,56	0,37	0,27
64	0,52	0,4	0,3	91	0,56	0,41	0,32
65	0,52	0,36	0,27	92	0,56	0,39	0,28
66	0,53	0,39	0,28	93	0,56	0,36	0,28
67	0,53	0,42	0,35	94	0,56	0,33	0,33

Monóxido de carbono (%) CO				Monóxido de carbono (%) CO			
Ensayo	∠ 16°	∠ 36°	∠ 53°	Ensayo	∠ 16°	∠ 36°	∠ 53°
95	0,57	0,37	0,3	122	0,6	0,43	0,32
96	0,57	0,39	0,28	123	0,6	0,4	0,29
97	0,57	0,38	0,34	124	0,6	0,41	0,33
98	0,57	0,33	0,35	125	0,6	0,43	0,27
99	0,57	0,38	0,29	126	0,6	0,42	0,29
100	0,57	0,37	0,33	127	0,6	0,35	0,35
101	0,57	0,35	0,31	128	0,6	0,35	0,27
102	0,57	0,39	0,35	129	0,6	0,35	0,3
103	0,57	0,43	0,33	130	0,6	0,41	0,34
104	0,58	0,37	0,29	131	0,61	0,38	0,34
105	0,58	0,41	0,29	132	0,61	0,39	0,26
106	0,58	0,41	0,34	133	0,61	0,42	0,33
107	0,58	0,38	0,35	134	0,61	0,39	0,3
108	0,58	0,34	0,32	135	0,61	0,36	0,26
109	0,58	0,36	0,31	136	0,61	0,42	0,27
110	0,58	0,43	0,26	137	0,61	0,38	0,28
111	0,58	0,37	0,33	138	0,61	0,41	0,29
112	0,58	0,36	0,26	139	0,61	0,33	0,31
113	0,58	0,37	0,32	140	0,62	0,36	0,28
114	0,59	0,36	0,26	141	0,62	0,37	0,32
115	0,59	0,43	0,28	142	0,62	0,38	0,34
116	0,59	0,39	0,29	143	0,62	0,41	0,33
117	0,59	0,39	0,33	144	0,62	0,42	0,33
118	0,59	0,42	0,31	145	0,62	0,35	0,35
119	0,59	0,43	0,26	146	0,62	0,39	0,28
120	0,59	0,35	0,35	147	0,62	0,39	0,29
121	0,59	0,38	0,29	148	0,62	0,35	0,31

Monóxido de carbono (%) CO			
Ensayo	∠ 16°	∠ 36°	∠ 53°
149	0,62	0,41	0,32
150	0,62	0,36	0,3
151	0,62	0,36	0,32
152	0,62	0,39	0,28
153	0,63	0,41	0,27
154	0,63	0,42	0,3
155	0,63	0,35	0,3
156	0,63	0,36	0,32
157	0,63	0,4	0,31
158	0,63	0,35	0,26
159	0,63	0,42	0,29
160	0,63	0,38	0,33
161	0,63	0,42	0,35
162	0,63	0,34	0,32

Anexo F: Cuadro de Hidrocarburos a diferente ángulo de contacto

Hidrocarburos (ppm) HC				Hidrocarburos (ppm) HC			
Ensayo	∠ 16°	∠ 36°	∠ 53°	Ensayo	∠ 16°	∠ 36°	∠ 53°
1	2152	1140	1008	21	2210	1097	1010
2	2202	1110	1024	22	2295	1083	1016
3	2298	1084	1000	23	2265	1141	1023
4	2253	1112	1030	24	2196	1145	1003
5	2124	1119	1011	25	2187	1083	1028
6	2181	1091	1005	26	2210	1082	1010
7	2254	1087	1016	27	2167	1090	1024
8	2190	1094	1012	28	2235	1139	1017
9	2240	1117	1002	29	2257	1110	1022
10	2285	1095	998	30	2246	1092	1012
11	2248	1137	1029	31	2303	1121	1008
12	2236	1131	1031	32	2317	1121	997
13	2266	1138	1009	33	2214	1134	1023
14	2283	1114	1026	34	2136	1106	1002
15	2297	1141	1029	35	2183	1088	1018
16	2169	1096	1005	36	2174	1135	1005
17	2230	1081	1025	37	2139	1135	997
18	2294	1116	1009	38	2169	1140	1020
19	2226	1104	1015	39	2185	1095	1004
20	2198	1123	1013	40	2127	1142	1027

Hidrocarburos (ppm) HC				Hidrocarburos (ppm) HC			
Ensayo	∠ 16°	∠ 36°	∠ 53°	Ensayo	∠ 16°	∠ 36°	∠ 53°
41	2303	1148	1004	68	2208	1139	996
42	2269	1098	1001	69	2236	1104	1018
43	2219	1125	1000	70	2251	1146	1030
44	2121	1136	1017	71	2195	1099	1006
45	2134	1133	1007	72	2178	1122	1026
46	2303	1133	1023	73	2217	1099	1020
47	2287	1112	1020	74	2161	1084	1003
48	2243	1113	1025	75	2297	1093	1015
49	2156	1137	1001	76	2237	1131	1016
50	2288	1142	1027	77	2287	1138	1004
51	2148	1114	1000	78	2228	1140	1022
52	2223	1091	1008	79	2303	1127	1012
53	2235	1086	1001	80	2136	1093	998
54	2191	1126	1011	81	2193	1145	1026
55	2146	1132	1006	82	2268	1092	1006
56	2279	1086	1014	83	2308	1120	1031
57	2305	1116	1003	84	2269	1148	1018
58	2161	1107	1021	85	2213	1149	997
59	2295	1094	997	86	2230	1117	1002
60	2161	1123	998	87	2254	1128	1025
61	2289	1101	1004	88	2157	1138	1012
62	2134	1102	1005	89	2240	1097	1031
63	2151	1087	1011	90	2243	1096	996
64	2214	1130	1008	91	2179	1082	1007
65	2275	1099	1018	92	2132	1092	1000
66	2122	1123	997	93	2313	1128	1027
67	2204	1090	1015	94	2166	1109	1021

Hidrocarburos (ppm) HC				Hidrocarburos (ppm) HC			
Ensayo	∠ 16°	∠ 36°	∠ 53°	Ensayo	∠ 16°	∠ 36°	∠ 53°
95	2288	1144	1001	122	2161	1102	1021
96	2163	1097	1019	123	2213	1115	1024
97	2309	1120	996	124	2129	1109	1029
98	2132	1089	1013	125	2226	1113	1024
99	2312	1129	1028	126	2126	1115	999
100	2296	1089	1019	127	2252	1103	1007
101	2290	1108	1015	128	2234	1086	1009
102	2187	1091	1016	129	2270	1095	1030
103	2224	1137	1013	130	2153	1096	1020
104	2212	1086	1002	131	2253	1094	1019
105	2194	1143	999	132	2186	1103	1010
106	2124	1090	1015	133	2260	1098	996
107	2308	1118	1022	134	2121	1085	1030
108	2171	1132	1021	135	2201	1086	1001
109	2176	1126	1031	136	2132	1129	1008
110	2241	1124	1025	137	2306	1130	1014
111	2235	1125	1026	138	2144	1137	1010
112	2141	1098	1011	139	2276	1107	1003
113	2147	1136	1006	140	2226	1095	1007
114	2130	1101	998	141	2206	1087	1028
115	2152	1085	1011	142	2270	1106	1025
116	2183	1105	1019	143	2283	1094	1014
117	2241	1092	1009	144	2310	1146	1017
118	2162	1122	1012	145	2195	1149	1005
119	2231	1085	1004	146	2235	1150	1027
120	2198	1135	998	147	2273	1124	999
121	2157	1090	1009	148	2289	1083	1010

Hidrocarburos (ppm) HC			
Ensayo	∠ 16°	∠ 36°	∠ 53°
149	2161	1118	1003
150	2290	1133	1002
151	2260	1136	999
152	2311	1134	1014
153	2182	1136	1017
154	2211	1139	1013
155	2197	1108	1016
156	2319	1147	1028
157	2174	1119	1023
158	2251	1147	1007
159	2212	1081	1029
160	2301	1083	1022
161	2183	1088	1006
162	2167	1132	996